

D. JUAN MIGUEL CAÑERO NIETO


Tesis Doctoral

METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL EN
SUPERFICIES DE ACERO INOXIDABLE MEDIANTE VISIÓN
POR COMPUTADOR



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Juan Miguel Cañero Nieto

 <http://orcid.org/0000-0003-0893-9891>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer
obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de
Málaga (RIUMA): riuma.uma.es



Defensa de Tesis
Óleo sobre tela de Moreno y Escandón (1736-1792).
Museo de Arte Colonial de Bogotá, Colombia.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Departamento de Electrónica

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Tesis Doctoral

METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE ÓXIDO
RESIDUAL EN SUPERFICIES DE ACERO INOXIDABLE
MEDIANTE VISIÓN POR COMPUTADOR

D. JUAN MIGUEL CAÑERO NIETO

Málaga, Octubre 2015

D. Juan Miguel Cañero Nieto: *Metodología de detección de óxido residual en superficies de acero inoxidable mediante visión por computador*, Ingeniero Industrial, © Octubre 2015

DIRECTOR TESIS:

Dr. D. Carlos González Spínola

COORDIRECTOR TESIS:

Dr. D. Manuel Jesús Martín Vázquez

CIUDAD:

Málaga

FECHA:

Octubre 2015

DECLARACIÓN

Dr. D. Carlos González Spínola

Profesor Titular
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

Dr. D. Manuel Jesús Martín Vázquez

Profesor Titular
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

CERTIFICAN:

Que la memoria titulada “*Metodología de detección de óxido residual en superficies de acero inoxidable mediante visión por computador*”, ha sido realizada por D. Juan Miguel Cañero Nieto bajo nuestra dirección en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga y constituye la Tesis que presenta para optar al grado de Doctor por la Universidad de Málaga.

Así mismo, manifestamos que el mencionado trabajo reúne sobradamente los requisitos necesarios para ser defendido como Tesis, lo informamos muy favorablemente y, en consecuencia, damos nuestro visto bueno y autorizamos la presentación y defensa de esta Tesis Doctoral en la Universidad de Málaga.

Málaga, Octubre 2015

Fdo.:

Dr. D. Carlos González Spínola

Director Tesis

Fdo.:

Dr. D. Manuel Jesús Martín Vázquez

Codirector Tesis

DECLARACIÓN

Dr. D. Fernando Vidal Verdú

Director
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

INFORMA:

Que D. Juan Miguel Cañero ha realizado en el Departamento de Electrónica el trabajo experimental que ha permitido la elaboración de la presente memoria de Tesis Doctoral.

Málaga, Octubre 2015



Fdo.:

Dr. D. Fernando Vidal Verdú

Director del Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

*Para mi esposa Ivonne y mi hija Victoria,
a mis padres Juan Miguel y Carmen,
a mi hermana María del Carmen y sobrinos,
con todo mi amor.*

RESUMEN

La presente tesis doctoral es una investigación que propone una alternativa basada en visión por computador a la detección, por parte de un operador humano, de un defecto superficial denominado óxido residual que puede producirse durante el procesamiento de bobinas de acero inoxidable en una línea de recocido y decapado.

En la memoria de tesis se establece una metodología de adquisición y procesamiento de imagen para la detección de óxido residual cuyo resultado es la construcción e implantación de un sistema de inspección visual automático utilizado para la validación de la metodología propuesta.

PUBLICACIONES

Derivadas de la presente tesis se han realizado las siguientes publicaciones y trabajos:

- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO NIETO, S. ESPEJO, S. MORILLAS, D. GUINEA, D. MARTÍN, F. GARCÍA-VACAS, E. VILLANUEVA, J. M. BONELO Y J. VIZOSO (2007) *Dispositivo para la Detección y Clasificación de óxido Residual en Líneas de Producción de Laminados Metálicos*. Oficina Española de Patentes y Marcas, Número de Publicación: 2 284 410, Número de Solicitud: 200700865, Fecha de Presentación: 02-04-2007, Fecha de Publicación de la Solicitud: 01-11-2007.
- GONZALEZ SPINOLA, CARLOS AND CAÑERO NIETO, JUAN MIGUEL AND GARCIA VACAS, FRANCISCO AND MARTIN VAZQUEZ, MANUEL JESUS AND VIZOSO LAPORTE, JULIO AND ESPEJO MEANA, SERVANDO AND MORILLAS CASTILLO, SERGIO AND GUINEA DIAZ, DOMINGO AND VILLANUEVA MARTINEZ, EUGENIO AND MARTIN GOMEZ, DAVID AND BONELO SANCHEZ, JOSE MARIA (2008) *Device for Detecting and Classifying Residual Oxide in Metal Sheet Production Lines*. Published Under the Patent Corporation Treaty (PCT), International Application Number: PCT/ES2007/000768, International Publication Number: WO/2008/119845, Publication Date: 09/10/2008, Priority Data: P200700865 02.04.2007 ES.
- GONZALEZ SPINOLA, CARLOS AND CAÑERO NIETO, JUAN MIGUEL AND GARCIA VACAS, FRANCISCO AND MARTIN VAZQUEZ, MANUEL JESUS AND VIZOSO LAPORTE, JULIO AND ESPEJO MEANA, SERVANDO AND MORILLAS CASTILLO, SERGIO AND GUINEA DIAZ, DOMINGO AND VILLANUEVA MARTINEZ, EUGENIO AND MARTIN GOMEZ, DAVID AND BONELO SANCHEZ, JOSE MARIA (2010) *Device for Detecting and Classifying Residual Oxide in Metal Sheet Production Lines*. Companies and Intellectual Property Commission (Republic of South Africa - Register of Patents), Official application Number: 2009/06761, Acceptance Date: 30-Mar-2010, International Application Number: PCT/ES2007/000768, Granted Date: 26-May-2010, Priority Date: 02/04/2007.
- GONZALEZ SPINOLA, CARLOS AND CAÑERO NIETO, JUAN MIGUEL AND GARCIA VACAS, FRANCISCO AND MARTIN VAZQUEZ, MANUEL JESUS AND VIZOSO LAPORTE, JULIO AND ESPEJO MEANA, SERVANDO AND MORILLAS CASTILLO, SERGIO AND GUINEA DIAZ, DOMINGO AND VILLANUEVA MARTINEZ, EUGENIO AND MARTIN GOMEZ, DAVID AND BONELO SANCHEZ, JOSE MARIA (2012) *Device for Detecting and Classifying Residual Oxide in Metal Sheet Production Lines*. Japan Patent Office - JPO, Application Number: JP,2010-501535, Registration Number: JP,5158993,B Filing Date: 28-Dec-2007, Registration Date: 21-Dec-2012.
- J. M. CAÑERO-NIETO, C. G. SPÍNOLA, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO, F. GARCÍA-VACAS, S. ESPEJO, J. VIZOSO Y G. HYLANDER : Detección y Medida del óxido Residual en Líneas de Producción de Acero Inox-idable Mediante Técnicas de Procesamiento de Imágenes. En *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI10)*, número 1, Bilbao, España, Jul. 2010.

- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO, S. ESPEJO, S. MORILLAS Y J. M. MARTÍN-VÁZQUEZ : Residual Oxides Detection and Measurement in Stainless Steel Production Lines. En *IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurements Systems and Applications (CIMSIA09)*, número 1, páginas 76–79, Hong-Kong, China, May. 2009.
- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO, S. ESPEJO, S. MORILLAS Y J. M. MARTÍN-VÁZQUEZ : Procesamiento de Imágenes para la Detección de óxidos Residuales en Líneas de Producción de Laminados Metálicos. En *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI08)*, número 1, páginas 951–956, Cartagena, España, Sep. 2008.
- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO, F. GARCÍA-VACAS, G. MORENO-ARANDA, S. ESPEJO, G. HYLANDER Y J. VIZOSO : Image Processing for Surface Quality Control in Stainless Steel Production Lines. En *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST10)*, número 1, páginas 192–197, Thessaloniki, Grecia, Jul. 2010.
- M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO Y J. VIZOSO : Sistema de Visión Artificial para la Detección de Soldaduras en Tiempo Real en Líneas de Proceso de Acero Inoxidable. En *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI09)*, número 1, páginas 2345–2356, Leganés, España, Jul. 2009.
- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO Y J. VIZOSO : Sistema de Visión para la Medida del Ancho de Bobinas de Acero. En *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI10)*, número 1, Bilbao, España, Jul. 2010.
- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO Y M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Real-Time Image Processing for Edge Inspection and Defects Detection in Stainless Steel Production Lines. En *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST11)*, páginas 170–175, Batu Ferringhi, Penang, Malaysia, May. 2011.
- C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO Y M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Continuous Real-Time Optical Measuring of Strip Width and Edge Inspection in Stainless Steel Production Lines. En *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC11)*, número 1, páginas 1–4, Binjiang, Hangzhou, China, May. 2011.
- J. M. CAÑERO-NIETO, C. G. SPÍNOLA, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ Y J. M. BONELO : Continuous Real-Time Optical Measuring of Strip Width and Edge Inspection in Stainless Steel Production Lines. *Journal of Pattern Recognition and Intelligent Systems*, 3(2):16–28, May. 2015.
- Proyecto OTRI (Código: 8.06/65.1974; Entidad: Acerinox, S.A.; Responsable: Carlos González Spínola; Año: 2002). *Estudio sobre la metodología para la construcción de un sistema de detección y clasificación de la cascarilla residual que pueda instalarse en la salida de las líneas de proceso de material procedente de LC.*

- Proyecto OTRI (Anexo 16 al acuerdo de colaboración de Código: 8.06/65.2184; Entidad: Tecnologías de la computación y comunicaciones, S.A.; Responsable: Carlos González Spínola; Año: 2003). *Desarrollo de un sistema de adquisición y procesado de imagen para la detección de líneas de soldadura entre bobinas en líneas de proceso de laminación en frío.*
- Proyecto OTRI (Código: 8.06/5.65.2653; Entidad: Tecnologías de la computación y comunicaciones, S.A.; Responsable: Carlos González Spínola; Año: 2006). *Aplicación del procesamiento de imágenes a sistemas de control de calidad de procesos industriales.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que han contribuido de una u otra forma a que fuese posible la conclusión de la presente tesis.

En primer lugar, a mi director de tesis, Dr. D. Carlos González Spínola por compartir su conocimiento y experiencia durante todos estos años que hemos trabajado juntos. Su orientación, apoyo y confianza han sido siempre un estímulo en mi desarrollo profesional. Esta tesis no hubiera sido posible sin su ayuda. Mi más sincero agradecimiento por todo.

A mi codirector de tesis, Dr. D. Manuel Jesús Martín Vázquez, su orientación, conocimiento y paciencia me han ayudado en momentos difíciles aportando soluciones y coherencia a la investigación.

Al Dr. D. Francisco García Vacas, porque sin su ayuda, el sistema de inspección nunca se hubiera convertido en una realidad. No quiero olvidarme de D. Juan Antonio Bascuñana y D. Jesús del Caz, personal del taller de mecanizado del SCAI de la Universidad de Málaga, por su esfuerzo y dedicación en la construcción de los sistemas de inspección.

Al Dr. D. José María Bonelo Sánchez, del Departamento de Sistemas Información de Acerinox Europa S.A.U., por su contribución en la implantación de los sistemas de inspección en las líneas de la factoría de Los Barrios (Cádiz).

A D. Francisco González Fernández, del Departamento de Mantenimiento de Acerinox Europa S.A.U., por su inestimable colaboración en la instalación y a D. Antonio Andújar Caballero, perteneciente al mismo Departamento, por estar allí siempre que necesitaba ayuda trabajando codo con codo. No quiero olvidarme de D. Domingo Martín Rodríguez, del Departamento Técnico, por sus consejos, aportaciones y predisposición.

A D. Francisco Ruiz Jiménez y a Félix Cruzado Gallardo, de Acerinox Europa S.A.U., por todas las gestiones y atención personal que tuvieron durante la implantación del sistema de inspección en la factoría de Columbus Stainless, (Pty) Ltd. de Sudáfrica. A Mr. Pieter J. Mitchell, Mr. Riaan Roux y Mr. Imtiaz Karodia, de la Sección de Control e Instrumentación, a Mr. Mike Harrington, de la Sección de Proyectos, y a Mr. Neville Fourie, de la Sección de Laminación en Frío, todos ellos pertenecientes a la factoría de Columbus Stainless, (Pty) Ltd., por sus gestiones, ayuda y exquisito trato personal.

A mis compañeros de T.C.C. S.A., Francisco Luque Solera, Isabel Blasco Amaro y Francisco Manuel Martín Tapia, por toda la ayuda que siempre prestaron y que, sin duda, todo esto no hubiera sido posible sin ella.

A todos mis amigos, que seguro me olvido de alguno, Rafa Carrasco, Alfredo, Yiyi e Inma, Sonia, Sandra, Manuel Raigón y Rosa Osorio, Auxi y Nelo, Rafa Portero, Nicol, Javi López, Isi, Cele, Paco Ruz, Manolo “Cristalero”, Juan Fernández, Fran Ruiz, Manolo Llamas, Paco Tejadera, Antonio Corral, por su apoyo y amistad.

Por último, a toda mi familia, por todo su amor, paciencia, cariño, comprensión y apoyo durante todos estos años en los que no he podido estar con ellos todo lo que hubiera deseado. Os quiero y amo por siempre: vuestro esposo, padre, hijo, hermano y tío.

ÍNDICE GENERAL

1	DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL EN SUPERFICIES DE ACERO INOXIDABLE	1
1.1	Introducción.	1
1.2	Detección manual de óxido residual.	5
1.3	Estudios previos para la detección de óxido residual.	6
1.3.1	Detección mediante sensor fotoeléctrico.	7
1.3.2	Detección mediante espectroscopia de emisión espacio-temporal.	10
1.3.3	Detección basada en iluminación láser.	12
1.4	Detección de óxido residual mediante visión por computador.	13
1.5	Objeto de la investigación.	13
1.6	Metodología.	14
1.7	Estructura de la memoria.	15
I	FUNDAMENTOS	17
2	INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA	19
2.1	Calidad e inspección industrial.	19
2.1.1	Aproximación al concepto de inspección.	19
2.1.2	Breve historia de la inspección industrial.	21
2.1.3	Variabilidad del proceso de producción.	22
2.1.4	Sistemas automáticos de control de calidad.	22
2.1.5	Consideraciones generales sobre la inspección visual.	23
2.2	Inspección visual automatizada.	24
2.2.1	Ventajas e inconvenientes de la inspección visual automatizada.	26
2.2.2	Consideraciones generales para un SIVA.	27
2.2.3	Clasificaciones de los sistemas SIVA.	28
2.3	Inteligencia artificial en los SIVA.	30
2.3.1	Sistemas expertos.	31
2.3.2	Aprendizaje inductivo.	32
2.3.3	Lógica borrosa.	32
2.3.4	Redes neuronales.	33
2.3.5	Otras técnicas.	39
2.4	Visión por computador: concepto y aplicaciones.	40
2.4.1	Etapas de la visión por computador.	42
2.5	Visión industrial por computador.	44
2.5.1	Arquitectura básica de un sistema de visión industrial.	45
2.5.2	Factores clave en el diseño de sistemas de visión industriales.	48
3	CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN	51
3.1	Especificación del sistema.	51
3.1.1	La tarea de visión y sus beneficios.	51
3.1.2	Tipo de sistema.	52
3.1.3	Descripción del objeto a inspeccionar.	53
3.1.4	Presentación.	54
3.1.5	Requerimientos de funcionamiento.	54
3.1.6	Interfaces de información.	54

3.1.7	Espacio.	55
3.1.8	Consideraciones del entorno.	55
3.2	Diseño del sistema.	56
3.2.1	Tipo de cámara.	56
3.2.2	Campo de visión.	59
3.2.3	Resolución.	60
3.2.4	Selección de elementos hardware.	61
3.2.5	Selección de la óptica.	64
3.2.6	Elección de la iluminación.	69
3.2.7	Diseño mecánico y mecánico.	72
3.2.8	Software.	73
3.3	Costes.	74
4	PROCESAMIENTO DE IMAGEN	75
4.1	Preprocesamiento.	77
4.1.1	Heterogeneidad de la iluminación.	77
4.1.2	Suavizado con preservado de bordes.	80
4.2	Segmentación.	83
4.2.1	Umbralización.	84
4.2.2	Métodos basados en discontinuidad.	90
4.2.3	Métodos basados en regiones.	91
4.3	Postprocesamiento.	92
4.3.1	Conceptos básicos sobre morfología.	92
4.4	Extracción de características.	96
4.5	Clasificación.	96
5	DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN LA PRODUCCIÓN DE ACERO	99
5.1	Técnicas aplicadas para la detección y clasificación.	100
5.1.1	Conclusiones.	105
5.2	Evaluación de los algoritmos de detección de defectos.	106
5.2.1	Criterios de evaluación objetivos del rendimiento de algoritmos.	106
6	CARACTERÍSTICAS DEL ÓXIDO RESIDUAL	111
6.1	Oxidación del acero inoxidable.	111
6.1.1	La capa de óxido.	111
6.2	Mecanismo de eliminación de la capa de óxido.	114
6.2.1	Líneas de recocido y decapado continuo.	116
6.2.2	El óxido residual.	120
6.3	Estudio espectrofotométrico.	121
6.3.1	Curvas espectrales.	122
6.3.2	Reflectancias de las muestras.	122
6.3.3	Bandas espectrales.	127
6.3.4	Promedios y desviaciones.	127
6.3.5	Diferencia entre reflectancias.	130
6.3.6	Conclusiones.	131
II	PROPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL	133
7	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	135
7.1	La imagen como resultado del proceso de adquisición.	137
7.2	Especificación del sistema.	137
7.2.1	Tarea de visión.	138
7.2.2	Beneficios obtenidos.	138
7.2.3	Tipo de sistema.	138

7.2.4	Descripción del objeto a inspeccionar.	139
7.2.5	Restricciones debidas a la ubicación.	143
7.2.6	Análisis de velocidades y tiempo de exposición.	148
7.2.7	Requerimientos de funcionamiento.	153
7.2.8	Interfaces de información.	155
7.3	Diseño del sistema de adquisición.	156
7.3.1	Tipo de cámara.	156
7.3.2	Resolución.	157
7.3.3	Óptica del sistema.	159
7.3.4	Consideraciones sobre elementos hardware.	170
7.3.5	Sistema de iluminación.	172
8	ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL	197
8.1	Estrategia general para la detección de óxido residual.	197
8.1.1	Segmentación mediante umbralización.	200
8.2	Preprocesamiento de la imagen.	202
8.2.1	Suavizado de imagen con preservado de bordes.	203
8.2.2	Subdivisión de la imagen.	206
8.2.3	Cálculo del histograma de las subimágenes.	208
8.2.4	Suavizado de histograma.	208
8.3	Segmentación de la imagen.	213
8.3.1	Estrategia de umbralización.	214
8.3.2	Umbral empírico de búsqueda para la umbralización.	215
8.3.3	Determinación del umbral.	227
8.3.4	Binarización de la imagen completa.	229
8.4	Postprocesamiento de imagen.	230
8.5	Etiquetado, extracción de características y clasificación.	232
8.5.1	Grupos dimensionales, etiquetado, mediciones y clasificación.	232
8.5.2	Resultados finales.	233
III	RESULTADOS, VALIDACIÓN Y CONCLUSIONES	235
9	RESULTADOS	237
9.1	Arquitectura del sistema de inspección visual automatizado.	239
9.2	Descripción del sistema de adquisición de imágenes.	242
9.2.1	Ubicación del sistema.	242
9.2.2	Soluciones de diseño mecánico.	242
9.2.3	Caja difusora.	244
9.2.4	Movimiento de barrido.	245
9.2.5	Movimiento de aproximación a la superficie.	246
9.2.6	Movimiento de enfoque de la cámara.	248
9.2.7	Control del servomecanismo.	249
9.2.8	Interfaz de control del servomecanismo.	249
9.3	Información de la línea de producción.	251
9.3.1	Determinación del metraje de la bobina.	251
9.3.2	Eventos en la línea de producción.	253
9.3.3	Datos y eventos de producción.	253
9.4	Adquisición y procesamiento de imágenes y datos.	254
9.4.1	Proceso de adquisición y procesamiento de imagen.	254
9.4.2	Datos generados por el procesamiento.	254
9.4.3	Almacenamiento de resultados.	256
9.5	Software del sistema de inspección.	257

9.6	Sistemas de inspección implantados.	259
10	VALIDACIÓN	263
10.1	Validación en laboratorio.	263
10.1.1	Procedimiento de validación.	263
10.1.2	Resultados.	264
10.2	Validación del sistema de inspección instalado en factoría.	274
10.2.1	Consideraciones previas.	274
10.2.2	Imágenes adquiridas y procesadas.	275
10.2.3	Pruebas de validación.	277
10.2.4	Resultados de las pruebas.	277
10.2.5	Resultados del sistema de inspección.	278
11	CONCLUSIONES	289
11.1	Principales aportaciones.	289
11.2	Futuras líneas de investigación.	291
IV	APÉNDICES	293
A	PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE	295
A.1	Introducción.	295
A.2	Procesos en acería.	295
A.2.1	Materias primas.	296
A.2.2	Horno de arco eléctrico.	297
A.2.3	Afinado del acero.	298
A.2.4	Colada continua.	299
A.3	Laminación en caliente.	301
A.3.1	Esmerilado.	302
A.3.2	Calentamiento.	302
A.3.3	Laminación.	303
A.4	Laminación en frío.	304
A.4.1	Recocido y decapado inicial.	306
A.4.2	Preparación de bobinas.	308
A.4.3	Laminación.	308
A.4.4	Recocido y decapado final.	310
A.4.5	Recocido brillante.	311
A.4.6	Temple superficial.	311
A.4.7	Líneas de corte.	312
A.4.8	Líneas de acabado.	312
A.4.9	Inspección final y embalado.	315
A.4.10	Otros productos finales.	315
A.5	Aplicaciones de los aceros inoxidables.	315
A.5.1	Arquitectura y construcción.	317
A.5.2	Automoción y transporte.	317
A.5.3	Residencial y comercial.	318
A.5.4	Industrial y procesos.	319
B	PROPAGACIÓN DE LA LUZ A TRAVÉS DE LOS MATERIALES	321
B.1	Introducción.	321
B.2	La luz.	321
B.3	Propiedades de los materiales.	322
B.3.1	Propiedades reflexivas.	322
B.3.2	Propiedades absorbentes.	323
B.3.3	Propiedades transmitivas.	323

B.4	Radiometría y fotometría.	325
B.4.1	Ángulo sólido.	326
B.4.2	Energía radiante (Q_e).	328
B.4.3	Flujo o potencia radiante (Φ_e).	328
B.4.4	Irradiancia y emitancia (E_e , M_e).	329
B.4.5	Intensidad radiante (I_e).	329
B.4.6	Radiancia (L_e).	331
B.5	Reflexión de superficies.	332
B.5.1	Textura superficial.	333
B.5.2	Modelización de la rugosidad.	334
B.5.3	Función de distribución de reflectancia bidireccional.	337
B.6	Tipos de superficies.	339
B.6.1	Superficies lambertianas.	339
B.6.2	Superficies especulares.	340
B.6.3	Superficies compuestas.	341
B.7	Propiedades ópticas de los metales.	342
C	TIPOS Y FUENTES DE ILUMINACIÓN	345
C.1	Tipos de iluminación.	345
C.1.1	Direccional.	345
C.1.2	Difusa.	345
C.1.3	A contraluz.	347
C.1.4	Estructurada.	347
C.1.5	Coaxial.	348
C.1.6	Campo oscuro.	348
C.1.7	Luz polarizada.	350
C.1.8	Resumen y selección de técnicas de iluminación.	351
C.2	Fuentes de luz.	351
C.2.1	Fuentes incandescentes.	351
C.2.2	Fuentes de descarga: fluorescentes.	352
C.2.3	Diodos LED.	353
C.2.4	Luz estroboscópica.	353
C.2.5	Láser.	354
C.2.6	Fibra óptica.	355
D	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN	357
D.1	Simulación de escenas 3D.	357
D.1.1	Algoritmo de la radiosidad.	358
D.2	Datos fotométricos de los proyectores estroboscópicos.	360
D.3	Datos para la simulación.	362
D.3.1	Características de la pirámide difusora.	362
D.3.2	Características de la caja difusora y ubicación de proyectores.	363
D.4	Resultados de las simulaciones.	365
E	CURVA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL TIPIFICADA	383
F	RESULTADOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS LINEAL Y NEURONAL	385
F.1	Índices para la comparación de modelos.	385
F.2	Histogramas de las variables.	386
F.3	Modelo lineal.	389
F.3.1	Validez y resultados del modelo lineal.	389
F.4	Modelo neuronal.	398
F.4.1	Validez y resultados del modelo neuronal.	398

G	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN	405
G.1	Elementos del sistema de adquisición.	405
G.2	PC de adquisición y procesamiento.	407
G.3	Aplicaciones software del sistema de inspección.	408
G.3.1	Adquisición y procesamiento de imagen.	408
G.3.2	Comunicación con PLC de control.	408
G.3.3	Monitorización y supervisión del operador de control de calidad.	409
G.3.4	Ajuste del sistema de inspección.	410
G.3.5	Monitorización y análisis y consulta de datos históricos.	413
	BIBLIOGRAFÍA	417

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Acero inoxidable con óxido superficial.	3
Figura 1.2	Acero inoxidable laminado en frío.	4
Figura 1.3	Lupa para inspeccionar óxido residual.	6
Figura 1.4	Sistema de detección mediante sensor fotoeléctrico.	8
Figura 1.5	Sensor fotoeléctrico.	9
Figura 1.6	Espectros de emisión de acero inoxidable y óxido de hierro.	11
Figura 1.7	Sistema óptico basado en iluminación láser.	12
Figura 2.1	Grados de libertad.	25
Figura 2.2	Sistema experto.	31
Figura 2.3	Clasificación de un objeto según su temperatura.	33
Figura 2.4	Modelo neuronal.	35
Figura 2.5	Componentes básicos de una neurona.	35
Figura 2.6	Tipos de funciones limitadoras o de transferencia más comunes.	36
Figura 2.7	Arquitectura del MLP.	38
Figura 2.8	Ciclo operativo de un algoritmo genético.	39
Figura 2.9	La visión por computador y su relación con otras disciplinas.	41
Figura 2.10	Etapas en el proceso de visión por computador.	43
Figura 2.11	Elementos de un sistema de visión industrial por computador.	46
Figura 2.12	Sistema de visión industrial por computador.	47
Figura 2.13	Factores clave en el diseño.	48
Figura 3.1	Tipo de cámara según distribución espacial.	56
Figura 3.2	Tecnologías.	57
Figura 3.3	Selección de la cámara en aplicaciones de inspección superficial.	58
Figura 3.4	Campo de visión (FOV, Field Of View).	59
Figura 3.5	Función de modulación de transferencia (MTF)	67
Figura 3.6	Distorsiones y difracciones.	68
Figura 3.7	Curvas de difracción y aberraciones.	68
Figura 3.8	Configuraciones del sistema de iluminación.	71
Figura 5.1	Clases anormales (defecto) y normales (sin defecto).	108
Figura 5.2	Curva ROC.	109
Figura 6.1	Corte transversal de la capa de óxido.	112
Figura 6.2	Línea de recocido y decapado continuo.	116
Figura 6.3	Sección de entrada.	117
Figura 6.4	Horno de recocido continuo.	117
Figura 6.5	Descascarillado y decapado.	117
Figura 6.6	Inspección final.	119
Figura 6.7	Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 1 y 2.	124
Figura 6.8	Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 3 y 4.	125
Figura 6.9	Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 5 y 6.	126
Figura 6.10	Distribución de las reflectancias para muestra 1.	128
Figura 6.11	Promedio y desviación estándar de reflectancias de muestras.	129
Figura 6.12	Diferencia reflectancias promedio ($\overline{R_{\text{acero}}} - \overline{R_{\text{óxido}}}$).	130
Figura 7.1	Tipo de producción.	139
Figura 7.2	Acabados superficiales.	140

Figura 7.3	Tamaños de grano (acero inoxidable austenítico tipo 304).	141
Figura 7.4	Tipos de texturas de superficies.	142
Figura 7.5	Alteraciones en superficie.	142
Figura 7.6	Óxido residual.	143
Figura 7.7	Manchas de óxido residual (imágenes de $4,12 \times 4,12$ mm).	144
Figura 7.8	Rodillo tensor.	145
Figura 7.9	Inspección sobre rodillo tensor.	146
Figura 7.10	Muestreo de la superficie (vista en planta).	148
Figura 7.11	Suma y resta de vectores.	150
Figura 7.12	Componentes de un vector.	150
Figura 7.13	Resultante de la velocidad relativa.	151
Figura 7.14	Dimensión y resolución de una mancha de óxido.	157
Figura 7.15	Modelo de lente delgada.	160
Figura 7.16	Dimensiones máximas barridas en el plano objeto.	162
Figura 7.17	Profundidad de campo.	165
Figura 7.18	Histograma genérico de una superficie con óxido residual.	169
Figura 7.19	Iluminación incidente direccional.	175
Figura 7.20	Comparativa iluminación difusa.	177
Figura 7.21	Principio de la iluminación libre de sombras.	178
Figura 7.22	Radiometría de la lente delgada.	179
Figura 7.23	Cronogramas de adquisición de imágenes.	183
Figura 7.24	Sistema basado en fuente de xenón y fibra óptica.	187
Figura 7.25	Imagen adquirida de la superficie (dimensión aproximada 6×8 mm).	187
Figura 7.26	Proyector estroboscópico.	188
Figura 7.27	Sistema basado en proyectores.	188
Figura 7.28	Técnica de iluminación basada en semiesfera traslúcida.	189
Figura 7.29	Pirámide difusora.	190
Figura 7.30	Interior caja difusora.	191
Figura 7.31	Ensayos y simulaciones.	192
Figura 7.32	Iluminancia sobre superficie de cálculo.	193
Figura 7.33	Resultados de la simulación.	195
Figura 8.1	Detección y clasificación de defectos de óxido residual.	199
Figura 8.2	Histograma genérico una imagen con defectos de óxido.	201
Figura 8.3	Operaciones de la etapa de preprocesamiento.	202
Figura 8.4	Filtro de preservado de bordes (I).	204
Figura 8.5	Filtro de preservado de bordes (II).	205
Figura 8.6	Subdivisión de la imagen original.	207
Figura 8.7	Dimensiones subimágenes.	207
Figura 8.8	Esquema de bloques general de un filtro FIR.	209
Figura 8.9	Diagrama del filtro FIR ($O_{FIR} = 6$).	210
Figura 8.10	Suavizado del histograma mediante filtro FIR ($O_{FIR} = 4$ y 5).	211
Figura 8.11	Suavizado del histograma mediante filtro FIR ($O_{FIR} = 6$ y 7).	212
Figura 8.12	Operaciones realizadas durante la etapa de segmentación.	213
Figura 8.13	Óxido residual en el histograma.	214
Figura 8.14	Análisis de la forma de histogramas.	217
Figura 8.15	Gráfico $[Ue]_{pron}$ y $[Ue]_{real}$ frente al número de casos.	221
Figura 8.16	Errores según el número de nodos en la capa oculta.	223
Figura 8.17	Arquitectura del perceptrón multicapa.	224
Figura 8.18	Gráfico $[Ue]_{pron}$ y $[Ue]_{real}$ frente al número de casos.	225
Figura 8.19	Rango dinámico de búsqueda del umbral T.	228

Figura 8.20	Operaciones realizada durante la etapa de postprocesamiento.	230
Figura 8.21	Etiquetado, extracción de características y clasificación.	232
Figura 9.1	Arquitectura general del sistema de inspección.	240
Figura 9.2	Arquitectura en niveles del sistema de inspección.	241
Figura 9.3	Soluciones mecánicas del sistema de adquisición.	243
Figura 9.4	Caja difusora.	244
Figura 9.5	Sistema de iluminación.	244
Figura 9.6	Movimiento de barrido (flecha roja).	245
Figura 9.7	Sistema de medición de ancho.	246
Figura 9.8	Movimiento de aproximación perpendicular (flecha roja).	247
Figura 9.9	Elementos para el movimiento de enfoque de la cámara.	248
Figura 9.10	Control del movimiento de enfoque.	248
Figura 9.11	Elementos del sistema de control del servomecanismo.	249
Figura 9.12	Funciones principales y estados del sistema de adquisición.	250
Figura 9.13	Interfaces de control del sistema.	250
Figura 9.14	Encóder rotativo incremental sobre eje del rodillo.	251
Figura 9.15	Sistema de seguimiento de soldadura.	252
Figura 9.16	Proceso de adquisición de imágenes.	255
Figura 9.17	Esquema general del software del sistema de inspección.	258
Figura 9.18	Sistema de inspección línea AP2 (<i>Acerinox Europa, S.A.U.</i>).	260
Figura 9.19	Sistema de inspección línea AP1 (<i>Columbus Stainless, (Pty) Ltd.</i>).	261
Figura 9.20	Sistema de inspección línea P4 (<i>Acerinox Europa, S.A.U.</i>).	262
Figura 10.1	Placas de muestra del fabricante.	264
Figura 10.2	Muestras 1a y 1b.	265
Figura 10.3	Procesamiento de imagen muestra 1a (óxido residual).	266
Figura 10.4	Procesamiento de imagen muestra 1b (óxido residual).	267
Figura 10.5	Muestras 4a y 4b.	268
Figura 10.6	Procesamiento de imagen muestra 4a (óxido residual).	269
Figura 10.7	Procesamiento de imagen muestra 4b (óxido residual).	270
Figura 10.8	Muestras 7 y 8ab.	271
Figura 10.9	Procesamiento de imagen muestra 7 (óxido residual).	272
Figura 10.10	Procesamiento de imagen muestra 8ab (óxido residual).	273
Figura 10.11	Discriminación de imágenes del tensor.	276
Figura 10.12	Imagen f01841: cuadro derecho con óxido e izquierdo sin óxido.	279
Figura 10.13	Análisis de la imagen f01841 (zona con óxido residual).	280
Figura 10.14	Análisis de la imagen f01841 (zona sin óxido residual).	281
Figura 10.15	Imagen f02131: cuadro derecho sin óxido e izquierdo con óxido.	282
Figura 10.16	Análisis de la imagen f02131 (zona con óxido residual).	283
Figura 10.17	Análisis de la imagen f02131 (zona sin óxido residual).	284
Figura 10.18	Imagen f03029: cuadro derecho con óxido e izquierdo sin óxido.	285
Figura 10.19	Análisis de la imagen f03029 (zona con óxido residual).	286
Figura 10.20	Análisis de la imagen f03029 (zona sin óxido residual).	287
Figura A.1	Productos finales de acería.	296
Figura A.2	Esquema general de procesos en acería.	296
Figura A.3	Materias primas.	297
Figura A.4	Horno de arco eléctrico.	298
Figura A.5	Convertidor AOD.	299
Figura A.6	Colada continua de radio curvo.	300
Figura A.7	Oxicorte.	301
Figura A.8	Productos de laminación en caliente.	301

Figura A.9	Esquema general de procesos en laminación en caliente.	302
Figura A.10	Horno de precalentamiento.	303
Figura A.11	Laminación en caliente.	304
Figura A.12	Acabados de laminación en frío.	305
Figura A.13	Esquema general de procesos en laminación en frío.	305
Figura A.14	Hornos de recocido.	306
Figura A.15	Línea de decapado.	307
Figura A.16	Tren de laminación sendzimir.	309
Figura A.17	Laminador skin-pass.	311
Figura A.18	Líneas de corte.	312
Figura A.19	Productos terminados.	313
Figura A.20	Acabados superficiales especiales.	314
Figura A.21	Acabados decorativos.	314
Figura A.22	Otros productos.	316
Figura A.23	Principales sectores de aplicación del acero inoxidable.	316
Figura A.24	Aplicaciones: arquitectura y construcción (2005).	317
Figura A.25	Aplicaciones: automoción y transporte.	318
Figura A.26	Aplicaciones: residencial y comercial.	319
Figura A.27	Aplicaciones: industrial y procesos.	320
Figura B.1	Propiedades reflexivas.	323
Figura B.2	Propiedades transmitivas.	324
Figura B.3	Ángulos subtendidos en el plano y el espacio.	327
Figura B.4	Ángulo sólido y apertura de la óptica de una cámara.	328
Figura B.5	Incidencia y exitancia radiante.	329
Figura B.6	Intensidad radiante e Irradiancia.	330
Figura B.7	Relación de irradiancias entre planos separados.	330
Figura B.8	Radiancia.	331
Figura B.9	Textura y rugosidad superficial.	333
Figura B.10	Patrones flexbar 16008.	335
Figura B.11	Reflexión según el tipo de superficie.	335
Figura B.12	Modelización de la rugosidad.	336
Figura B.13	BRDF.	337
Figura B.14	Ley del coseno.	339
Figura B.15	Superficies especulares.	341
Figura C.1	Iluminación direccional.	345
Figura C.2	Iluminación difusa.	346
Figura C.3	Iluminación a contraluz.	347
Figura C.4	Iluminación estructurada.	348
Figura C.5	Iluminación coaxial.	349
Figura C.6	Iluminación de campo oscuro.	349
Figura C.7	Iluminación por luz polarizada.	350
Figura C.8	Comparación de técnicas de iluminación.	351
Figura C.9	Fluorescentes.	353
Figura C.10	LED.	354
Figura C.11	Estroboscopios.	355
Figura C.12	Láser.	355
Figura C.13	Fibra óptica.	356
Figura D.1	Radiosidad y geometría del factor de forma.	358
Figura D.2	Proyector Cricket.	360
Figura D.3	Proyector Lith-o-light-5.	360

Figura D.4	Diagramas polares proyectores estroboscópicos (Unilux Inc.).	361
Figura D.5	Planos de montaje y placa individual de la pirámide difusora.	362
Figura D.6	Ubicación proyectores y superficie de cálculo (dimensiones en mm).	363
Figura D.7	Infografías proyector Cricket. Rotaciones sobre eje X_{fi} .	366
Figura D.8	Infografías proyector Lith-o-Light-5. Rotaciones sobre eje X_{fi} .	367
Figura D.9	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 0^\circ$). Modelo Cricket.	368
Figura D.10	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 10^\circ$). Modelo Cricket.	369
Figura D.11	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 20^\circ$). Modelo Cricket.	370
Figura D.12	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 30^\circ$). Modelo Cricket.	371
Figura D.13	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 40^\circ$). Modelo Cricket.	372
Figura D.14	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 50^\circ$). Modelo Cricket.	373
Figura D.15	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 60^\circ$). Modelo Cricket.	374
Figura D.16	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 0^\circ$). Modelo LoL5.	375
Figura D.17	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 10^\circ$). Modelo LoL5.	376
Figura D.18	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 20^\circ$). Modelo LoL5.	377
Figura D.19	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 30^\circ$). Modelo LoL5.	378
Figura D.20	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 40^\circ$). Modelo LoL5.	379
Figura D.21	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 50^\circ$). Modelo LoL5.	380
Figura D.22	Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 60^\circ$). Modelo LoL5.	381
Figura E.1	Tabla distribución normal tipificada.	383
Figura F.1	Histograma mediana $[m]_{ROI}$.	386
Figura F.2	Histograma desviación estándar $[\sigma]_{ROI}$.	387
Figura F.3	Histograma curtosis $[c]_{ROI}$.	387
Figura F.4	Histograma sesgo $[s]_{ROI}$.	388
Figura F.5	Histograma umbral empírico $[Ue]_{real}$.	388
Figura F.6	Resumen del modelo lineal.	392
Figura F.7	Normalidad de los residuos.	393
Figura F.8	Dispersión de los residuos (homocedasticidad).	394
Figura F.9	Regresión lineal $[Ue]_{pron}$ frente a variable $[m]_{ROI}$.	394
Figura F.10	Regresión lineal $[Ue]_{pron}$ frente a variable $[\sigma]_{ROI}$.	395
Figura F.11	Regresión lineal $[Ue]_{pron}$ frente a variable $[c]_{ROI}$.	395
Figura F.12	Regresión lineal $[Ue]_{pron}$ frente a variable $[s]_{ROI}$.	396
Figura F.13	Tabla de diagnóstico de colinealidad.	396
Figura F.14	Gráfico $[Ue]_{pron}$ y $[Ue]_{real}$ frente al número de casos.	397
Figura F.15	EAM en función del número de nodos en la red oculta.	399
Figura F.16	EA _{Max} en función del número de nodos en la red oculta.	399
Figura F.17	Perceptrón multicapa (5 nodos en capa oculta).	400
Figura F.18	Análisis del entrenamiento y post-entrenamiento.	402
Figura F.19	Dispersión de los residuos.	403
Figura F.20	Gráfico $[Ue]_{pron}$ y $[Ue]_{real}$ frente al número de casos.	404
Figura G.1	Sensor de desplazamiento ultrasónico.	405
Figura G.2	Elementos en interior de caja difusora.	405
Figura G.3	Autómata programable (armario de control).	406
Figura G.4	Servo-drivers (armario de potencia).	406
Figura G.5	Chasis industrial 19".	407
Figura G.6	Aplicación de monitorización y supervisión.	409
Figura G.7	Aplicación de ajuste del sistema de inspección.	412
Figura G.8	Análisis de datos históricos y estadísticos.	415

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Técnicas de inteligencia artificial aplicadas en un SIVA.	31
Tabla 3.1	Tareas, evaluaciones y metas.	52
Tabla 3.2	Comparativa tecnología CCD y CMOS.	58
Tabla 3.3	Precisión esperada en la medida.	60
Tabla 3.4	Ancho de banda máximo según la tecnología del bus.	63
Tabla 3.5	Técnicas aplicables según configuración del sistema de iluminación.	71
Tabla 4.1	Comparativa de métodos de segmentación de imágenes.	84
Tabla 5.1	Tipos de defectos superficiales según el tipo de producto.	100
Tabla 5.2	Técnicas aplicadas para la detección de defectos.	101
Tabla 5.3	Técnicas aplicadas para la clasificación de defectos.	102
Tabla 5.4	Características extraídas de las imágenes.	103
Tabla 5.5	Evaluación de la calidad del detector mediante el índice <i>AUC</i> .	109
Tabla 6.1	Composición química (acero inoxidable austenítico 316).	113
Tabla 6.2	Secuencia de decapado.	118
Tabla 7.1	Variación del módulo y ángulo de la resultante.	152
Tabla 7.2	Magnificación y resolución mínima ($R_s^*=20$ lp/mm).	161
Tabla 7.3	Dimensiones del área barrida por la cámara (en mm).	163
Tabla 7.4	Profundidad de campo teórica calculada para $f = 50$ mm.	166
Tabla 8.1	Coeficientes b del filtro FIR ($O_{FIR} = 6$).	210
Tabla 8.2	Resultados del modelo matemático de regresión lineal.	219
Tabla 8.3	Índices estadísticos del error (modelo neuronal).	224
Tabla 8.4	Índices estadísticos del error (ambos modelos).	226
Tabla B.1	Franjas espectrales.	325
Tabla B.2	Magnitudes radiométricas y fotométricas.	326
Tabla C.1	Criterios generales para la elección del tipo de iluminación ([1]).	352
Tabla D.1	Posición de los proyectores estroboscópicos en interior de caja.	364
Tabla F.1	Pesos sinápticos y sesgos de la red neuronal.	400

ACRÓNIMOS

ANPR	Automatic Number Plate Recognition, Reconocimiento Automático de Matrículas de Vehículos
AOD	Argon-Oxygen Decarburization, Descarburización Argón-Oxígeno
AOI	Automated Optical Inspection, Inspección Óptica Automatizada
APL	Annealing and Pickling Line, Línea de Recocido y Decapado
ASIS	Automatic Surface Inspection System, Sistema de Inspección de Superficie Automático
ASTM	American Society for Testing and Materials, Asociación Americana para Experimentación y Materiales
AVI	Automated Visual Inspection, Inspección Visual Automatizada

xxxii

BA	Bright Annealing, Recocido Brillante
BPNN	Back Propagation Neural Net, Red Neuronal Retropropagada
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function, Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional
CCD	Charge Coupled Device, Dispositivo de Carga Acoplada
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage, Comisión Internacional de la Iluminación
CIM	Computer Integrated Manufacturing, Fabricación Integrada por Computador
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, Semiconductor Complementario de Óxido de Metal
CNN	Convolutional Neural Net, Red Neuronal Convolutacional
COTS	Commercial Off-The-Shelf, Estándar o Comercial
DFT	Discrete Fourier Transform, Transformada Discreta de Fourier
DOF	Depth of Field, Profundidad de Campo
DWT	Discrete Wavelet Transform, Transformada Wavelet Discreta
DSP	Digital Signal Processor, Procesador Digital de Señales
EAF	Electric Arc Furnace, Horno de Arco Eléctrico
FIR	Finite Impulse Response, Respuesta Finita al Impulso
FOV	Field of View, Campo de Visión
FPGA	Field-Programmable Gate Array, Array de Puertas Programables de Campo
GPU	Graphics Processing Unit, Unidad de Procesamiento Gráfico
GUI	Graphical User Interface, Interfaz Gráfica de Usuario
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IIR	Infinite Impulse Response, Respuesta Infinita al Impulso
KNN	K-Nearest Neighbors, K-Vecinos más Cercanos
LUT	Look-Up Table, Tabla de Consulta
LVQ	Learning Vector Quantization, Cuatificación del Vector Aprendizaje
MLP	Multilayer Perceptron, Perceptrón Multicapa
MTF	Modulated Transfer Function, Función de Transferencia Modulada
NIR	Near Infra-Red, Infrarrojo Cercano
NUV	Near Ultra-Violet, Ultravioleta Cercano
OCR	Optical Character Recognition, Reconocimiento Óptico de Caracteres
OCV	Optical Character Verification, Verificación Óptica de Caracteres
PC	Personal Computer, Computador Personal
PLC	Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable

QED	Quantum ElectroDynamics, Electrodinámica Cuántica
ROI	Region Of Interest, Región de Interés
RTU	Remote Terminal Unit, Unidad Terminal Remota
SDK	Software Development Kit, Kit de Desarrollo de Software
SIVA	Sistema de Inspección Visual Automatizada
SMD	Surface Mount Device, Dispositivo de Montaje Superficial
SOM	Self-Organizing Map, Mapa Auto-Organizado
SVM	Support Vector Machines, Máquinas de Vector Soporte
UDWT	Undecimated Discrete Wavelet Transform, Transformada Wavelet Discreta No Decimada
VPN	Virtual Private Network, Red Virtual Privada

DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL EN SUPERFICIES DE ACERO INOXIDABLE

1.1 INTRODUCCIÓN.

El acero inoxidable es un material de gran valor añadido y de una importancia creciente en nuestra sociedad. Es usado de forma extensiva gracias a sus excelentes propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión entre otras propiedades, no menos importantes, como son su gran resistencia al calor, fabricación relativamente sencilla, excelente relación resistencia-peso, bajo coste del ciclo de vida, neutralidad biológica, fácil limpieza y características estéticas [2].

La gran resistencia a la corrosión que tiene este material y que le da el nombre de *inoxidable* va a ser una consecuencia de su composición química básica: aleación de hierro con un contenido de carbono inferior al 1,2 % y un contenido de cromo superior al 10,5 %¹. Esta composición asegura la formación de una capa protectora superficial autorregenerable rica en cromo denominada *capa pasiva*² que evita la corrosión del hierro.

Los aceros inoxidables comenzaron a producirse a principios del siglo XX principalmente para aplicaciones en la industria química. Con el paso de tiempo se fueron desarrollando distintas variedades de aceros adaptándose, cada una de ellas, a unas condiciones determinadas de operación. En la actualidad existen más de cien tipos distintos de acero utilizados ampliamente en la industria alimentaria, industria automovilística, construcción, en aplicaciones médicas, etc.³

El control de calidad ha sido clave para esta gran diversificación de los tipos de acero inoxidable a casi cualquier condición de operación. Aunque inicialmente fue propiciado por la decisión del fabricante de mejorar los métodos y modos de producción a fin de obtener mayores beneficios, con el paso de los años, el cliente ha jugado un papel fundamental demandando una mayor calidad en el producto final lo que ha provocado que los niveles de exigencia de la calidad se trasladen en cada una de las etapas por las que pasa la fabricación del producto.

De especial interés es el incremento en la calidad del acabado superficial del acero provocado, no solamente por una mayor competitividad entre los fabricantes, sino por la creciente diversificación en su uso que demanda, en muchos casos, una alta calidad superficial.

En una sociedad cada vez más concienciada por el medioambiente el acero inoxidable ha demostrado ser un material muy sostenible debido a su larga vida, bajo coste de mantenimiento y gran capacidad de reciclado. Este hecho ha permitido que la industria del acero inoxidable, comparada con otras industrias de fabricación de materiales, sea la de mayor potencial de crecimiento futuro [7].

¹ Tipos de familias de aceros y características principales en apéndice A.

² Con un espesor de aproximadamente de entre 1,5 y 4 nm está compuesta fundamentalmente por Cr_2O_3 y es estable, densa, invisible y bastante adherente [3, 4, 5, 6].

³ Ver sección A.5 en apéndice A.

Producido en una acería, en formatos de producto tipo desbaste y palanquilla, el acero inoxidable⁴ es conformado en caliente en un tren de laminación dando lugar a planchas y bobinas, siendo estas últimas uno de los productos más comunes en los que varios cientos de metros de chapa, de espesor y ancho variable, son enrollados formando la bobina.

El espesor final de la bobina se obtiene mediante conformado en frío en un nuevo proceso de laminación en el que suelen ser habituales reducciones de espesor del 80 %. Para posibilitar esta nueva laminación se requerirá previamente homogeneizar las propiedades del material y conferir cierto grado de ductilidad a la bobina mediante un proceso denominado *recocido* en el cual se regenera la estructura cristalina del acero y se eliminan las tensiones internas acumuladas tras el proceso de laminación en caliente. El proceso de recocido es un tratamiento térmico que consiste, básicamente, en elevar la temperatura del acero a valores comprendidos entre 800 y 1100 °C, según el tipo de acero, y mantenerla durante un tiempo determinado tras el cual se realiza el enfriamiento del metal.

Durante los procesos de laminación en caliente y recocido se genera una capa de óxido de color gris oscuro sobre la superficie del acero debido a la reacción química producida entre los distintos metales de la superficie con el oxígeno contenido en el vapor de agua proveniente del ambiente y/o de la propia combustión del gas natural que se emplea para calentar el horno de recocido [8].

Esta capa de óxido, en función de la composición química del acero inoxidable y del tipo y condiciones estequiométricas de la atmósfera en la que se ha realizado el tratamiento térmico, puede estar compuesta por varios tipos de óxidos siendo los más importantes el Cr_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , SiO_2 , MnO y NiO [9]. La composición de la superficie bajo el sustrato de la capa de óxido va a tener una concentración baja en cromo perdiendo la capacidad de formar una capa pasiva lo suficientemente consistente y homogénea para resistir la corrosión, en el mejor de los casos, o dificultando la formación de ésta en el caso más desfavorable. Este es el principal motivo por el que la eliminación de esta capa de óxido es muy importante para poder mantener la resistencia a la corrosión que tiene el acero inoxidable [4, 10].

Cualquier óxido debería eliminarse para restaurar al acero inoxidable a su condición óptima de resistencia a la corrosión. La eliminación de la capa de óxido y la zona inmediatamente debajo de ésta, con concentración baja en cromo, se efectúa mediante un procedimiento de decapado. Éste consta de una serie de etapas que incluyen procesos mecánicos y químicos.

Tanto el recocido como el decapado de la bobina se realizan en líneas de acabado de proceso continuo que permiten procesar varias bobinas consecutivamente gracias a la unión, mediante soldadura, efectuada entre cada final de una bobina y el principio de la siguiente.

Previamente al decapado se van a realizar una serie de pretratamientos superficiales para optimizar el rendimiento y reducir el tiempo necesario para el decapado. Este tipo de pretratamientos suelen ser baños de diversos tipos de sales como NaCl , NaOH y Na_2SO_4 cuya finalidad principal es mejorar la solubilidad del óxido durante los procesos químicos.

Una vez realizado el pretratamiento se somete a la bobina a procesos de granallado con arena de sílice y partículas metálicas, como métodos más usados dentro de los denominados procesos mecánicos, en los que, entre otras finalidades, se mejora la permeabilidad de la capa de óxido generando grietas en la misma.

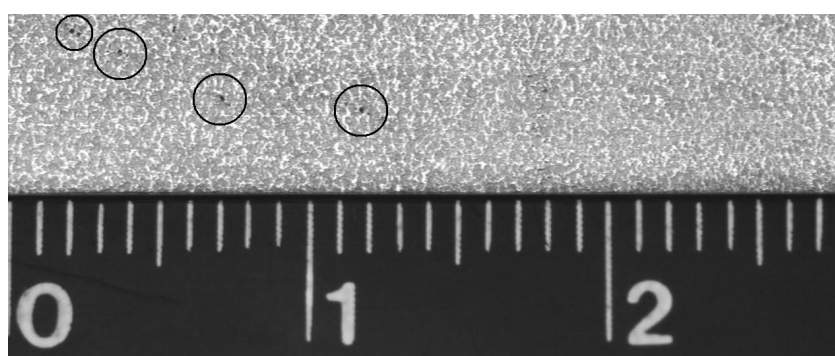
⁴ Puede verse una explicación de todo el proceso de producción del acero inoxidable en las secciones A.2, A.3 y A.4 del apéndice A.

Las grietas originadas en la capa de óxido facilitarán la eliminación de la misma mediante la reacción química que se produce entre el óxido y los ácidos contenidos en una serie de baños especiales. El objetivo de estos baños ácidos consiste en eliminar la capa de óxido y la zona con baja concentración de cromo y permitir la formación de una nueva capa pasiva óptima frente a la corrosión. En general, primeramente se hará pasar la bobina por un baño con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para producir una eliminación *basta* de la capa de óxido y, seguidamente, por un baño con una mezcla de ácido fluorhídrico y nítrico (HF y HNO_3). El ácido fluorhídrico reaccionará con el óxido para disolverlo mientras que el ácido nítrico actuará como elemento de control de la reacción (su volumen en la mezcla determinará la tasa de eliminación de óxido) y como agente oxidante del cromo del metal base para la creación y estabilización de la capa pasiva.

Debido a que la cantidad y composición química de la capa de óxido generada puede variar, así como, ciertas variables relacionadas con el proceso de decapado, la eliminación de la capa de óxido puede no ser completa quedando sobre la superficie de la bobina manchas de óxido (figura 1.1a). En el caso de que estas manchas sean de pequeño tamaño se denominarán óxido residual [11] o, en el argot del acero inoxidable, *cascarilla residual*⁵ (figura 1.1b).



(a) Superficie con óxido.



(b) Superficie con óxido residual.

Figura 1.1: Acero inoxidable con óxido superficial.

⁵ El tamaño de la cascarilla residual (*residual oxide scale*, en inglés) está comprendido entre 50 y 200 μm .



Figura 1.2: Acero inoxidable laminado en frío.

Si no se elimina completamente el óxido superficial antes del proceso de laminación en frío se podrían producir problemas operativos durante la laminación [12, 13, 14]. En otros casos, los problemas vienen después de la laminación dificultando procesos como el recocido final y operaciones para la obtención del acabado superficial final, como son los revestimientos y tintes especiales [15]. En cualquier caso, la calidad superficial siempre va a verse afectada.

La figura 1.2 muestra el aspecto superficial de un acero inoxidable que ha sido laminado con óxido residual sobre su superficie. En ella se pueden apreciar las marcas alargadas de color grisáceo dejadas por el óxido una vez que el acero ha sido decapado.

Cuando la cantidad de óxido residual es suficientemente significativa, el material no se laminará y tendrá que pasar por la línea nuevamente para ser decapado [11]. Si la cantidad de óxido residual es grande el material quedará completamente inservible, incluso para realizar un nuevo decapado, por lo que se llevará a la acería donde será fundido comenzando todo el proceso de producción.

Una vez finalizado el proceso de producción del material y puesto en operación bajo condiciones de servicio, un acero inoxidable con óxido residual sufrirá corrosión localizada que, de extenderse, podría llegar a provocar el fallo del material [16, 14, 10] cuya gravedad dependerá de la función operativa encomendada al material.

Desde el punto de vista económico, los problemas originados por el óxido residual van a ocasionar una serie de costes relacionados con la producción (demoras en los tiempos de producción, pérdida de productividad, movimientos de material, consumo extra de energía y materiales, retrasos en los plazos de entrega al cliente, etc.), con la calidad (depreciación del valor de venta, reclamaciones y devoluciones de productos, insatisfacción y pérdida del cliente, etc.) y con la vida útil del material una vez puesto en operación (mantenimiento excesivo, envejecimiento acelerado, fallo prematuro y sustitución, etc.) contribuyendo, en mayor o menor grado, a la pérdida de competitividad del fabricante.

1.2 DETECCIÓN MANUAL DE ÓXIDO RESIDUAL.

La tarea de inspección visual para ejercer la acción de control de calidad ha sido encargada tradicionalmente a personal experto formado y entrenado específicamente en la tarea. El rendimiento de esta tarea depende de diversos factores relacionados con el trabajo, el entorno, la organización industrial, etc. [17].

La determinación de la calidad superficial del acero inoxidable, en lo que a óxido residual concierne, se realiza al final de la línea de recocido y decapado. Para ello, el personal de control de calidad detiene por un instante el movimiento de la línea de manera que la bobina pueda ser inspeccionada con seguridad. Es en este momento cuando el operador de control de calidad, usando una lupa de pequeñas dimensiones (figura 1.3), realiza una serie de muestreos⁶ en diferentes zonas de la superficie de la bobina buscando óxido residual y estimando, de forma aproximada, su tamaño y cantidad en caso de encontrarlo. Finalmente, el inspector asignará un determinado grado de calidad superficial a la bobina en función del óxido residual encontrado basándose en las directrices establecidas por el departamento de control de calidad.

Los principales problemas e inconvenientes que van a originarse cuando la detección de óxido residual es realizada por un operador humano serán los siguientes:

- *Inconsistencia en la detección.* La reflectancia de la superficie del acero inoxidable y su rugosidad dificultarán la inspección debido a los brillos y sombras que se originan. Así, los brillos pueden llegar a ocultar el óxido residual y las sombras confundir al inspector haciéndole creer erróneamente que son óxido residual.
- *Subjetividad del inspector.* No siempre va a estar el mismo inspector y no todos tendrán el mismo criterio. Aunque así lo fuera, un mismo inspector variará su propio criterio dependiendo de varios factores (monotonía, repetitividad, fatiga, cansancio, estado físico y psicológico, etc.).
- *Retraso en las medidas correctivas.* Cuando el óxido superficial aparece no será detectado inmediatamente por el inspector demorándose la aplicación de las medidas correctivas que subsanan el defecto. La ubicación del inspector al final de la línea y el momento elegido por éste para realizar la inspección contribuirán a este retraso.
- *Detección discreta o discontinua.* Por motivos de seguridad, no es posible que el inspector analice la superficie si la línea no está parada. Si a esto se le añade que el número de veces que se detiene la línea para realizar la inspección superficial ha de ser el menor posible, de forma que afecte lo mínimo a la productividad, la superficie de bobina inspeccionada siempre será muy pequeña.
- *Criterio determinante.* Al estar el número de muestreos limitado, el grado de calidad considerado por el inspector para una pequeña zona determinará la calidad del resto. El coste económico de una mala asignación de la calidad superficial será muy alto.

⁶ Cada muestreo realizado por la lupa barre una superficie aproximada de 20x20 mm. El número de muestreos que realiza el inspector suele estar comprendido entre cinco y diez. Durante esta parada, el inspector realiza también mediciones del ancho y el espesor de la bobina.



Figura 1.3: Lupa para inspeccionar óxido residual.

- *Información carente de contenido.* No se pueden obtener datos de inspección consistentes y completos que puedan ser usados para generar información fiable del óxido residual detectado en la bobina.

1.3 ESTUDIOS PREVIOS PARA LA DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL.

El presente apartado da una visión general de los estudios que han sido abordados previamente a esta tesis para la detección de óxido residual en bobinas de acero inoxidable. En ellos, el problema de la detección ha sido planteado de diversas formas tratando de cumplir con una serie de criterios que les permitiera su implantación en un entorno industrial como objetivo final. Estos criterios son los siguientes:

- Han de discriminar, de manera suficiente, el óxido residual de la superficie de la bobina.
- Otros tipos de defectos superficiales que pudiera contener la superficie no deben influir en la detección.
- La detección ha de ser realizada en tiempo real.
- La superficie inspeccionada se desplaza de forma continua dentro de un rango de velocidades determinado.
- La calidad de la superficie se establece en función de la cantidad de óxido residual encontrado por unidad de superficie inspeccionada, es decir, la densidad de óxido.
- Diseñados para operar dentro una línea de acabado en un entorno industrial agresivo por lo que deben ser lo suficientemente robustos, de fácil mantenimiento y viables económicamente.

Los estudios analizados tratan de resolver el problema de la detección de diferentes formas ([18, 19, 20]):

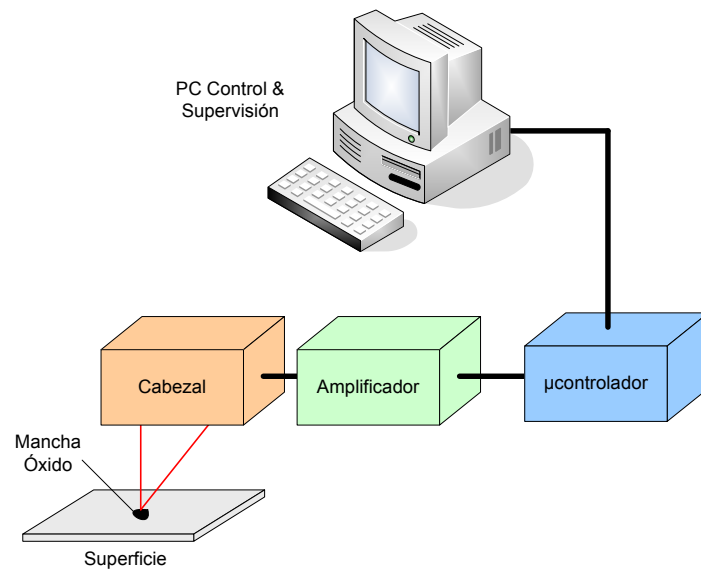
- Utilización de sensores fotoeléctricos.
- Aplicación de espectroscopia de emisión espacio-temporal.
- Empleo de iluminación láser.

1.3.1 Detección mediante sensor fotoeléctrico.

Esta técnica se basa en la diferencia de reflectancia que existe entre el acero inoxidable y el óxido cuando ambos tipos de superficies son iluminadas por una misma fuente de luz. Para la obtención de la reflectancia, el sistema de detección emplea un sensor láser fotoeléctrico de reflexión. Este sensor está constituido por un emisor, basado en un diodo láser que emite un haz colimado de 650 nm de longitud de onda, y un receptor, que adquiere la componente reflejada por la superficie que se inspecciona.

El sistema de detección (figura 1.4) está compuesto de los siguientes elementos:

- *Cabezal* (figura 1.5a), donde se encuentra el emisor láser y el sensor receptor de reflectancia. El cabezal es fijado a una distancia de la superficie de la bobina (70 mm) dentro de su rango de operación (± 15 mm). A esta distancia, el diámetro del haz en el punto de incidencia con la superficie es de, aproximadamente, 50 μ m lo que determina el tamaño mínimo de la mancha de óxido residual que el sistema es capaz de detectar.
- *Amplificador* (figura 1.5b), cuyas funciones son:
 - Acondicionar, muestrear (cada 80 μ s) y discretizar (entre 0 y 4095 puntos) la señal de reflectancia.
 - Fijar el valor umbral que discrimina el óxido de la superficie (valor de la reflectancia) y umbralizar.
 - Generar una salida binaria con el resultado del análisis.
- *Microcontrolador*, que realiza una serie de funciones:
 - Adquiere el valor de la señal de reflectancia y la señal digital resultado del análisis.
 - Configura el valor de umbral del amplificador.
 - Establece la comunicación con el sistema supervisor para la transmisión de datos.
- *PC de control y supervisión*:
 - Adquiere los datos transmitidos por el microcontrolador.
 - Obtiene datos relativos al tipo de acero que se inspecciona.
 - Permite la calibración del sensor para distintos tipos de aceros y acabados superficiales.
 - Analiza los datos disponibles para calcular el umbral de detección más adecuado.
 - Almacena los resultados.



(a) Esquema general.



(b) Instalado en factoría.

Figura 1.4: Sistema de detección mediante sensor fotoeléctrico.

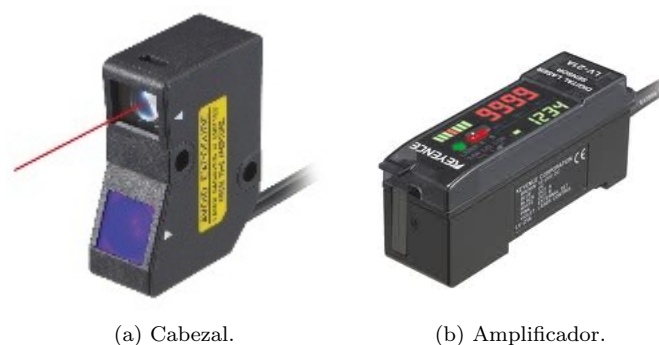


Figura 1.5: Sensor fotoeléctrico.

Este sistema de detección presenta una serie de ventajas:

- Sistema simple y fácilmente implementable.
- Genera un resultado binario: existencia o no de óxido sobre la superficie.
- No requiere procesamiento posterior una vez obtenidos los resultados.
- Poco voluminoso.
- Robusto.
- Bajo coste.
- Instalado y validado su funcionamiento en línea de acabado real.

Pero también se pueden apreciar ciertas desventajas:

- La reflectancia puede verse seriamente afectada por una serie de variables:
 - Ángulo de incidencia del haz láser: la superficie de la banda de acero puede venir inclinada o con ciertos defectos superficiales que hacen variar este ángulo (olas en borde, rizado, etc.).
 - Tipo de acero: variación de la reflectividad debida a la composición química del acero.
 - Acabado superficial: variación de la reflectividad debida a las características superficiales del acero (rugosidad, tamaño de grano, etc.). La estructura irregular de la superficie va a originar una dispersión aleatoria en la reflexión del haz láser. Así, una mayor dispersión se correspondería con una menor reflectividad lo que podría originar, en el peor de los casos, una detección de óxido errónea.
 - Defectos superficiales en la bobina de acero (grietas, arañazos, muescas, etc.). También provocan una dispersión del haz reflejado que afecta directamente a la reflectividad.
 - Condiciones de la superficie (manchas de agua por un inadecuado secado de la superficie, manchas de aceite y grasa, polvo, etc.).

- La respuesta binaria generada por el sistema, resultado de inspeccionar una superficie circular de $50\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, no va a permitir realizar una clasificación dimensional del óxido detectado (por ejemplo, según el tamaño de las manchas de óxido). En el caso de sistemas de inspección con cámaras, se trabaja con imágenes las cuáles poseen la suficiente cantidad de información como para poder abordar el análisis dimensional.
- Debido a que el sistema inspecciona una superficie reducida, no es capaz de discriminar defectos y detectar ciertas condiciones de la superficie que podrían afectar a los resultados del análisis (detectar óxido cuando no lo hay y viceversa) disminuyendo la fiabilidad y robustez de los resultados. Un sistema implementado con cámaras inspecciona mayor superficie y, a priori, podría realizar una discriminación de estos defectos y condiciones.

Por ejemplo, la superficie inspeccionada por un sensor fotoeléctrico S_s es bastante menor si se compara con un sistema de inspección automatizado basado en cámaras S_c .

- Según las características del sensor, la superficie que se inspecciona en un segundo será el número de inspecciones realizadas en ese tiempo N_i por la superficie inspeccionada por el sensor S_i :

$$S_s = N_i \cdot S_i = \frac{1}{80\text{ }\mu\text{s}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{50}{2}\text{ }\mu\text{m}\right)^2 = 12500 \cdot 3,14 \cdot 6,25 \cdot 10^{-10} = 24,54\text{ mm}^2 \quad (1.1)$$

- Considerando un sistema de inspección compuesto por una cámara donde cada imagen adquirida representa una superficie $22\text{ mm} \times 28\text{ mm}$, con una sola imagen adquirida por segundo se muestrearía una superficie $S_c = 616\text{ mm}^2$.

1.3.2 Detección mediante espectroscopia de emisión espacio-temporal.

Se trata de una técnica que discrimina acero inoxidable y óxido a partir de las diferencias en la composición química de ambos materiales. Para obtener la composición química del material se calienta una pequeña cantidad de éste, inferior a $0,1\text{ }\mu\text{g}$, hasta que alcance la incandescencia utilizando un pulso láser ultravioleta de alta potencia y corta duración. Una vez alcanzada la incandescencia el material emitirá una luz que es característica de su composición atómica.

El instrumento que se utiliza para obtener la composición química de los materiales se denomina espectrómetro óptico o espectroscopio que, generalmente, mide la intensidad luminosa generada por el material incandescente en función de la longitud de onda u otras unidades proporcionales a la energía del fotón (frecuencia y electrón-voltios).

Las pruebas realizadas sobre una muestra de acero inoxidable con óxido residual y otra de óxido de hierro para la detección de oxígeno mostraban la existencia de un intervalo de longitudes de onda $[730, 790]\text{ nm}$ en el que se observaba una respuesta relevante en el acero inoxidable ante la presencia de óxido de hierro (figura 1.6).

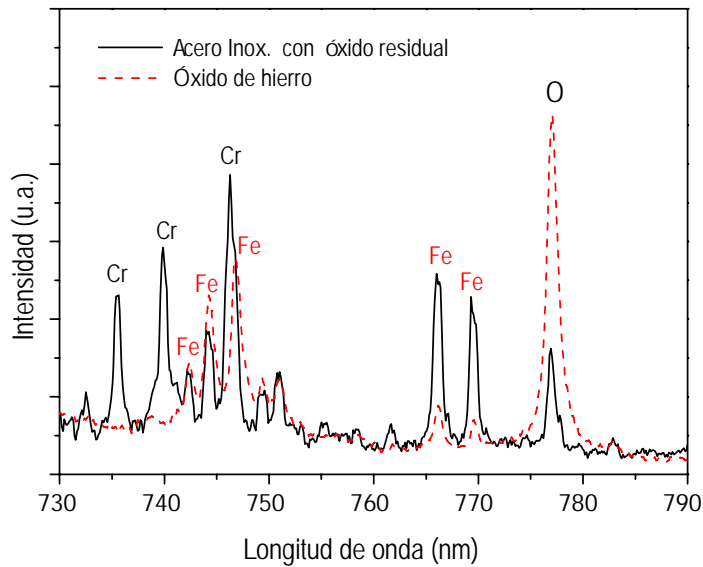


Figura 1.6: Espectros de emisión de acero inoxidable y óxido de hierro.

Las ventajas que se obtienen con este sistema de detección son las siguientes:

- Gran sensibilidad a la detección de óxido lo que permite una fácil discriminación del acero inoxidable.
- Detecta manchas de óxido de pequeño tamaño ($\approx 20 \mu\text{m}$).
- Permite la detección en tiempo real.
- Paralelamente se puede utilizar para identificar otros componentes de la superficie del material.
- Este sistema puede combinarse con un tren de pulsos láser para la eliminación del óxido superficial disponiendo en un único sistema de las operaciones de inspección y limpieza.

Entre los inconvenientes pueden apreciarse los siguientes:

- Las pruebas han sido realizadas con un equipo de laboratorio en condiciones controladas.
- En el mercado, un espectrómetro óptico industrial puede llegar a tener un coste elevado.
- La instalación e integración de un sistema de este tipo en una línea de acabado puede resultar compleja.
- Se trata de un sistema de inspección destructivo ya que requiere evaporar una pequeña cantidad de material superficial. Se desconoce, a priori, qué implicaciones puede tener su uso en lo que a calidad superficial del material respecta.

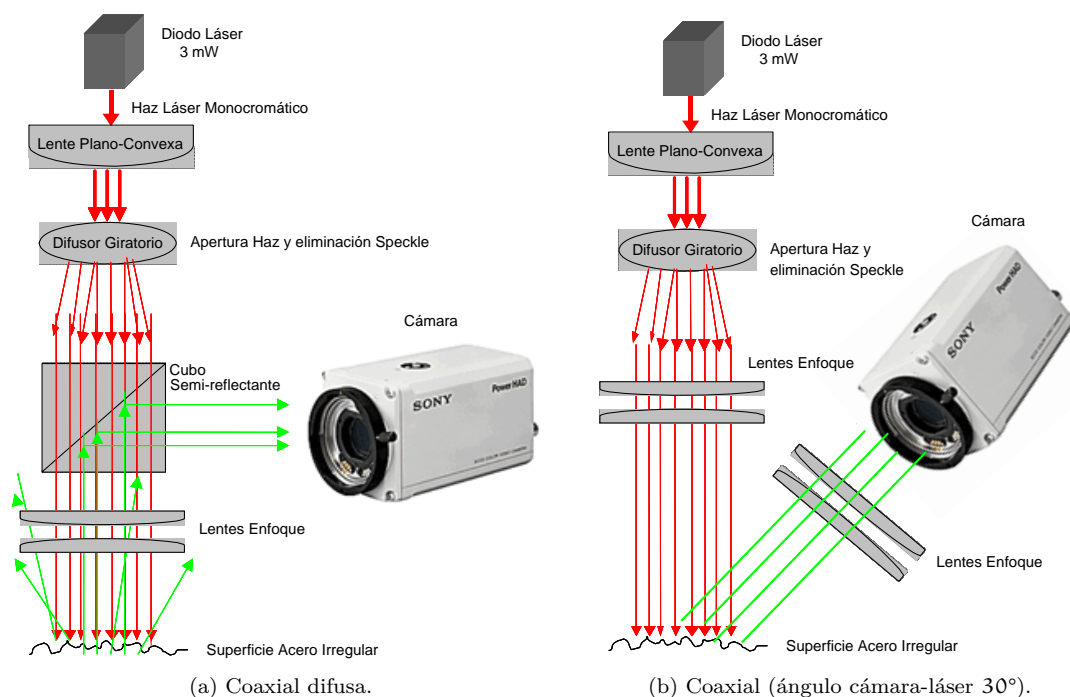


Figura 1.7: Sistema óptico basado en iluminación láser.

1.3.3 Detección basada en iluminación láser.

Esta técnica discrimina acero inoxidable y óxido por procesamiento de imagen con la particularidad de usar un sistema de iluminación no convencional basado en láser. Mediante esta técnica se consigue iluminar una pequeña superficie de $10 \times 100 \text{ mm}^2$ aplicando iluminación coaxial difusa (apéndice C.1.5). Las imágenes de la superficie son adquiridas por una cámara y procesadas posteriormente en un computador aplicando algoritmos que discriminan las manchas de óxido contenidas en la imagen.

El haz emitido por un diodo láser (figura 1.7a) es corregido por una lente telecéntrica generando un haz colimado que atraviesa un difusor giratorio cuya finalidad es abrir el haz del láser y evitar el ruido originado por los patrones de interferencias (fenómeno *speckle*) antes de iluminar la superficie. Posteriormente, los haces reflejados por la superficie son enfocados en la cámara mediante un conjunto de lentes. El uso de un cubo semi-reflectante permite la disposición en *T* del conjunto láser-cámara-superficie.

Partiendo de esta técnica se desarrolló una nueva configuración (figura 1.7b) en la que se prescinde del cubo semireflectante para disponer el sistema de iluminación y la cámara formando un ángulo de 30°.

Aunque esta técnica es una buena solución y ha sido probada con éxito en laboratorio bajo condiciones de operación controladas tiene el inconveniente de que solo ha sido validada mediante pruebas puntuales. Por otro lado, su implantación en un entorno industrial agresivo resulta compleja debido al tipo de elementos que la componen (lentes, difusor giratorio y cubo semi-reflectante).

1.4 DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL MEDIANTE VISIÓN POR COMPUTADOR.

La utilización de sistemas de visión industrial automatizada puede ser una buena solución para la detección de óxido residual. Por un lado, la mayoría de los defectos son defectos ópticos superficiales detectables por el ojo humano por lo que *a priori* también podrían ser detectados por sistemas de visión automatizados ya que ambos usan principios ópticos para la detección. Por otro lado, resuelven los inconvenientes inherentes que plantea la inspección realizada por el operador humano para la detección defectos.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado sistemas de este tipo que han resuelto satisfactoriamente problemas de detección de defectos en multitud de ámbitos como la madera, el textil, el papel, la electrónica, el aluminio, el acero, etc., demostrando el gran interés que tienen para la investigación aplicada y su viabilidad para la implantación a nivel industrial.

En la industria siderúrgica, los sistemas de inspección automatizada han tenido un gran auge debido fundamentalmente a las innovaciones producidas en la electrónica y en las tecnologías de la información. Ésto ha dado lugar a un gran desarrollo de aplicaciones de procesamiento y análisis de imagen que proporcionan nuevas oportunidades para la detección, reconocimiento y clasificación de defectos superficiales.

Las técnicas y metodologías usadas por este tipo de sistemas se agrupan dentro del concepto de *machine vision* [21]:

La visión máquina o *machine vision* es el estudio de los métodos y técnicas los sistemas de visión artificial pueden ser construídos y empleados en aplicaciones prácticas abarcando la ciencia y la ingeniería de la visión.

Los sistemas de visión industrial por computador quedan englobados dentro de la denominada visión por computador (o *computer vision*) y son diseñados para realizar tareas únicas y repetitivas en las que se requiere alta velocidad de procesamiento, gran magnificación óptica, tiempo de operación elevado, repetibilidad y precisión, entre otros.

1.5 OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.

La presente tesis doctoral propone una alternativa basada en visión por computador a la detección, por parte de un operador humano, de un defecto superficial denominado óxido residual que puede producirse durante el procesamiento de bobinas de acero inoxidable en una línea de recocido y decapado.

Tiene dos objetivos fundamentales:

1. El primer objetivo consiste en la elaboración de una metodología para la detección de óxido residual en superficies de acero inoxidable basada en visión por computador.

La metodología elaborada deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Detectar el óxido residual sobre superficies de acero inoxidable en movimiento de manera fiable, robusta y eficiente.
 - Tener en cuenta toda la variedad de tipos de acero y acabados superficiales.
 - Cuantificar la cantidad de óxido residual existente sobre la superficie y lo clasifique dimensionalmente según los criterios establecidos por el fabricante.
 - Ser viable para poder aplicarse en un entorno industrial agresivo, en concreto, en una línea de recocido y decapado de una fábrica de producción de acero inoxidable.
2. El segundo objetivo será la construcción e implantación de un sistema automático basado en la metodología previamente elaborada que permita obtener los datos necesarios para la validación de la metodología propuesta.

Una vez construido, el sistema automático de detección de óxido residual será implantado en un sistema real de producción de acero. En concreto, en una de las líneas de recocido y decapado que el fabricante Acerinox Europa, S.A.U. tiene en su factoría de Los Barrios en la provincia de Cádiz.

1.6 METODOLOGÍA.

La investigación se dividirá en dos etapas consecutivas y realimentadas entre ellas:

1. Desarrollar una arquitectura general de adquisición de imágenes de superficies de acero inoxidable apta para la detección de óxido residual, teniendo en cuenta toda la problemática que conlleva su implementación posterior en una línea de recocido y decapado de la industria siderúrgica. Dentro de esta tarea, se estudiarán determinados aspectos relacionados con la adquisición de imágenes como son la cámara y óptica del sistema de visión, el sistema de iluminación para la zona de inspección, la velocidad de adquisición y transferencia de imágenes, etc.
2. Desarrollar un algoritmo de procesamiento de imágenes que conduzca a una detección de óxido residual en el entorno industrial en el que se encuentra. Para ello, se estudiarán el preprocesamiento de imágenes, el desarrollo de algoritmos de detección de óxido residual, la evaluación de la capacidad de procesamiento, la identificación de cuellos de botella, optimización de algoritmos, etc.

Con los resultados obtenidos, se construirá e implantará un sistema que implemente la arquitectura de adquisición y procesamiento de imagen propuesta con la finalidad de obtener datos que permitan validar el sistema.

Para la realización de esta tesis doctoral se ha contado con la colaboración del personal perteneciente a los departamentos de calidad e informática industrial de la factoría que Acerinox Europa, S.A.U. tiene en Los Barrios (Cádiz).

1.7 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.

La presente memoria de tesis es el resumen de varios años de trabajo y ha dado como fruto diversas ponencias en congresos, publicaciones en distintas revistas de automática y una patente que integra toda la metodología para la detección de la cascarilla residual que se presenta en esta tesis.

Esta línea de trabajo fue iniciada en el año 2001 como una colaboración entre el Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga, el Instituto de Microelectrónica de Sevilla y el Instituto de Automática Industrial de Madrid ambos pertenecientes al Centro Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.), Innovaciones Microelectrónicas S.L. (Anafocus) y Tecnologías de la Computación y Comunicaciones S.A. (T.C.C., S.A.).

La estructura de la memoria se divide en tres partes y éstas, a su vez, en capítulos.

En la primera parte, denominada *Fundamentos*, se establecen una serie de conceptos básicos sobre los que se apoya la tesis. Así, en el capítulo 2, se tratan algunos conceptos básicos relacionados con la inspección de la calidad dentro del ámbito industrial, los sistemas de inspección automatizados y qué soluciones pueden aportar este tipo de sistemas en distintos ámbitos. En el mismo capítulo, se explican los sistemas de inspección visual, la problemática que plantean y cómo pueden ser una buena alternativa a la inspección realizada por un operador humano. También, se describen los elementos que componen un sistema de inspección visual automatizado, se da una visión genérica de las etapas que componen la visión por computador particularizados a sistemas de tipo industrial y se explican una serie de criterios y factores a tener en cuenta en el diseño de un sistema de visión industrial automatizado.

El capítulo 3 aborda cuestiones fundamentales a resolver cuando se diseña un sistema de visión industrial automatizado y las etapas de las que puede dividirse el diseño haciendo mención a aquellos costes a tener en cuenta para el diseño, implementación, instalación y mantenimiento del sistema.

El capítulo 4, profundiza en las etapas que componen el procesamiento de imagen y desarrolla una serie de fundamentos básicos relacionados con cada etapa.

En el capítulo 5, se realiza una revisión del estado del arte sobre técnicas de detección y clasificación de defectos desarrolladas en el ámbito de la producción de productos de acero inoxidable a modo de aproximación a una solución para el problema de la detección de óxido residual.

El capítulo 6, se describe el óxido residual, cuáles son sus características fundamentales y cómo es su proceso de formación dentro de una línea de recocido y decapado. Al final de este capítulo, se muestra un estudio espectrofotométrico, realizado por el *Instituto de Automática Industrial* (IAI) del *Centro Superior de Investigaciones Científicas* (CSIC) en Madrid, donde se comparan las características reflectivas del óxido residual y del acero inoxidable cuyas conclusiones son de gran interés y fundamentales para el desarrollo de esta tesis, ya que, sobre ellas se apoya.

La segunda parte, denominada *Propuesta del sistema de detección de óxido residual*, es el núcleo de la tesis y en ella, se va a establecer y desarrollar una propuesta de arquitectura de adquisición y procesamiento de imágenes para la detección de óxido residual en superficies de acero inoxidable mediante visión por computador. En concreto, el capítulo 7, desarrolla el proceso de diseño del sistema de inspección visual automatizado desde el punto de vista de la adquisición de imágenes particularizándolo a la detección de óxido mediante una serie de criterios y especificaciones.

En el capítulo 8, se plantea la estrategia de procesamiento a llevar a cabo sobre la imagen para la detección de óxido residual de forma fiable y robusta. Así, se definen las operaciones que se van a realizar en cada una de las etapas de la tarea de visión: preprocesamiento de la imagen, segmentación, postprocesamiento, etiquetado, extracción de características y clasificación.

La tercera y última parte, denominada *Resultados, validación y conclusiones*, expone el resultado alcanzado derivado de la metodología y plasmado en forma de sistema de inspección visual automatizado (capítulo 9), cómo se ha realizado la validación de la metodología propuesta (capítulo 10) y, finalmente, las principales aportaciones de la tesis y una serie de aspectos relacionados con futuras líneas de investigación que podrían dar continuidad al presente trabajo (capítulo 11).

Se han añadido una serie de apéndices que complementan la exposición de la memoria y desarrollan cálculos y resultados parciales con idea de no romper el desarrollo de la memoria y facilitar su lectura.

Finalmente, se ha añadido una extensa bibliografía sobre la temática tratada compuesta de artículos de investigación, libros y documentos técnicos sobre la que se hace referencia a lo largo de la memoria.

Parte I

FUNDAMENTOS

INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA

2.1 CALIDAD E INSPECCIÓN INDUSTRIAL.

El capítulo actual pretende dar una visión general de la inspección, en qué consiste y por qué es necesaria dentro del proceso de producción industrial, qué tipos existen y cuáles son las ventajas e inconvenientes de la automatización del proceso de inspección visual. La automatización de este proceso da como resultado distintos tipos de sistemas de inspección visuales automatizados basados en visión por computador que generalmente integran cierta inteligencia artificial. Éstos generan soluciones a un gran número de aplicaciones apoyándose en una arquitectura general y teniendo en cuenta una serie de factores clave.

2.1.1 *Aproximación al concepto de inspección.*

La calidad en el producto siempre ha sido uno de los aspectos más importantes de las operaciones de manufactura. Las tendencias económicas actuales y el proceso de globalización existente, que eleva la competitividad entre los fabricantes a nivel mundial, estimulan el mejoramiento continuo de la calidad llegando a tener una gran prioridad dentro de los procesos de producción. La prevención de defectos en productos y en inspección en línea son objetivos primordiales de la fabricación donde la calidad se debe incorporar en el producto a lo largo de todo el proceso de fabricación [22]. De esta manera, sólo cuando la productividad y la calidad se consideran de forma conjunta será factible alcanzar una mayor grado de competitividad.

La abundante bibliografía existente sobre el concepto de calidad ofrece múltiples definiciones. Dentro de estas definiciones, las más significativas y comúnmente aceptadas son las siguientes:

Calidad es el conjunto de características de una entidad que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades establecidas y las implícitas (UNE-EN-ISO-8402).

Calidad es la totalidad de las características y aspectos de un producto o servicio en las que se basan su aptitud para satisfacer una necesidad dada (European Organization for Quality Control, EOQC).

Calidad es conformidad (P. Crosby).

Calidad es satisfacción del cliente al mínimo coste (P. Drucker)

Calidad es la pérdida económica que un producto impone a la sociedad desde el momento de su expedición (E. Taguchi).

Se define *función de calidad* como el conjunto completo de actividades a través de las cuales es posible alcanzar la aptitud para el uso de un determinado producto, independientemente del momento y lugar en el que se realicen. Así, la función de calidad será el resultado de una calidad en el diseño, en la fabricación, en el tiempo y en el servicio post-venta.

La función de calidad puede ser expresada también como *gestión para la calidad* integrando tres procesos de gestión denominados la *trilogía de Juran* [23]: planificación, control y mejora de la calidad.

Dentro de esta trilogía, la inspección forma parte del proceso de *control de la calidad* definido éste como el conjunto de actividades cuyo objetivo es mantener un proceso dentro de los límites predeterminados, de forma que siga cumpliendo los objetivos operativos.

Para alcanzar este objetivo se emplean tres etapas: evaluación del comportamiento real de la calidad, comparación del comportamiento real con los objetivos de calidad y actuación sobre las diferencias.

Una vez emplazada la inspección dentro del ámbito de la calidad, el concepto de *inspeccionar* será examinar, medir, contrastar o ensayar las características de calidad de un producto para determinar si cumple o no con las especificaciones consideradas que ha de tener.

En cierta manera, la inspección industrial trata de determinar si una o varias características de un producto se encuentran dentro de los valores que se esperan de ellas para lo cual debe considerarse aspectos tales como la ubicación donde ha de realizarse la inspección dentro del proceso productivo, el método para evaluar la característica y la técnica a emplear.

En lo que respecta a la ubicación, donde se va a realizar la inspección, se debe establecer claramente el lugar para realizarla dentro del proceso completo de producción ([24]):

- En la recepción de materias primas. Determina la calidad de los materiales de entrada para comprobar si son adecuados para su utilización en el proceso de producción.
- Durante el proceso y sobre productos intermedios. Examina la salida de una etapa intermedia del proceso para verificar si se está dentro de los valores de control establecidos.
- Sobre los productos terminados. Determina la aceptación o rechazo del producto final. Las características de un producto que se evalúan para su aceptación o rechazo serán todas aquellas susceptibles de ser medidas tanto cuantitativamente como cualitativamente (también se le suele denominar muestreo por variables o por atributos respectivamente).

Tanto en las etapas intermedias como a la finalización del proceso de producción suele recogerse información estadística para calcular tendencias, reajustar el proceso de producción o determinar el reemplazo o sustitución de herramientas y máquinas.

El método y la técnica a emplear responderán al cómo va a realizarse la inspección, los elementos de medición que se requerirán y quién realizará la inspección apoyándose sobre los sentidos, instrumentos de medida, patrones de comparación o sobre equipos de pruebas y ensayos.

Respecto al modo o forma de realizar la inspección se podría realizar de tres maneras distintas [24]:

- Inspección *por atributos* o inspección *cualitativa*. Clasificar ciertos atributos o características de los objetos bajo inspección como aceptados o rechazados. Por ejemplo, una inspección por atributos sería la realizada sobre una tarjeta de circuito impreso en el que se pretende determinar si falta o no un determinado componente electrónico; la inspección realizada sobre botellas para determinar si están llenas o no, si llevan puesto un tapón, etc.; inspección de células fotovoltaicas buscando arañazos o grietas para aceptarlas o rechazarlas, etc.
- Inspección *por variables* o inspección *cuantitativa*. Medir alguna característica del objeto (longitud, peso, etc.). Este es el caso de la medición del espesor [25], la longitud [26] o el ancho de una chapa [27]; inspección y verificación final de motores eléctricos mediante la medición de ciertas variables eléctricas, etc.
- Inspección *gradual* o *híbrida*. Se trata de una inspección híbrida de las dos anteriores y que consiste en la clasificación de un producto basándose, para ello, en el grado de aceptabilidad de cierta característica. Por ejemplo, este sería el caso de las granjas avícolas en las que se clasifican los huevos de gallina según el peso del huevo (L, M, XL, etc.).

2.1.2 Breve historia de la inspección industrial.

La inspección industrial comienza a desarrollarse como tal durante la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII para conseguir productos mínimamente estandarizados con dimensiones consistentes que permitieran ser sustituidos fácilmente (Eli Whitney, 1765-1825).

Con el paso del tiempo, los avances que se habían alcanzado y nuevas ideas como las de Frederick W. Taylor (1856-1915) sobre la distribución del trabajo, asignación de responsabilidades, elaboración de protocolos y procedimientos, etc., dieron lugar a la aparición de la figura del operario encargado de inspeccionar los productos y su adecuación a las especificaciones. Este operario es el *inspector de control de calidad*, y con él aparece la tarea de controlar la calidad. Estas fueron las bases para que, a principios del siglo XX, apareciese el concepto de producción en serie o en cadena (Henry Ford, 1863-1947) cuyas bases operacionales requerían de un gran número de inspectores de calidad.

La complejidad alcanzada en la estructura organizativa de la producción requería el desarrollo de departamentos especializados en inspección cuya responsabilidad principal era la calidad del producto. Durante gran parte del siglo XX, la organización de la inspección estuvo normalmente separada del proceso productivo hasta que se constató que la calidad del producto no podía darse desde fuera sino desde el propio proceso de producción.

Con el advenimiento en las últimas décadas del siglo XX del concepto de fabricación CIM (computer integrated manufacturing, fabricación integrada por computador), en el cual se utilizan las tecnologías informática, de comunicación y de información.

El concepto de CIM resulta ser un elemento unificador e integrador de cada una de las fases que componen el trabajo de una factoría, desde la gestión, la planificación, el diseño, la fabricación, simulación, gerencia, contabilidad, etc. La combinación de equipos, programas, bases de datos y comunicaciones permitirá una automatización flexible de la producción, la optimización continua de la programación y productividad, el control de flujo de materiales y operaciones en ciclo cerrado y la coordinación y reasignación dinámica de recursos consiguiendo maximizar el rendimiento de los sistemas productivos y minimizar los tiempos de diseño y fabricación.

En este entorno automatizado se favorece la integración de las operaciones de inspección dentro del proceso productivo formando parte de éste. De cómo sea esta integración dependerá la mejora de la producción [28].

2.1.3 Variabilidad del proceso de producción.

Un proceso de producción generará productos que difieren en sus propiedades dentro de un determinado rango de tolerancia. Las causas de esta variabilidad en el proceso se deben a la falta de uniformidad en las materias primas, las propiedades estocásticas del control del proceso, variaciones ambientales (temperatura, humedad, presión, vibraciones, etc.) y tareas que involucran al operador humano [29].

Uno de los objetivos del proceso de producción será acotar esta variabilidad en función de la calidad deseada fijando para ello unos límites de tolerancia. De esta manera, los productos fabricados podrán quedar clasificados entre los que han sido producidos dentro de los límites de tolerancia (productos aceptados) y los que están fuera de ellos (productos rechazados).

Si no se puede llegar a un compromiso entre la calidad deseada para un producto y la variabilidad del proceso de producción habrá que desarrollar soluciones para reducir ésta última. Pero hay un inconveniente, esta variabilidad nunca se podrá eliminar completamente puesto que casi siempre habrá procesos de producción controlados no exentos de variación y operaciones que involucran a operadores humanos [30].

Tanto en un caso como en el otro, el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías mejorarán el control de los procesos de producción y la incidencia del factor humano reduciendo la variabilidad. Esto permitiría que los niveles de calidad exigidos pudieran ser mayores consiguiendo, de esta manera, una posición estratégica predominante sobre los competidores.

2.1.4 Sistemas automáticos de control de calidad.

Para alcanzar una solución a un determinado problema de control de calidad, el diseño de un sistema automático de control de calidad debe considerar las siguientes tareas básicas [31, 32]:

1. *Adquisición de datos* (señales o imágenes) mediante sensores.
2. *Preprocesamiento de los datos* para la eliminación o reducción de ruido, compensar desajustes, corregir aberraciones en imágenes, mejora de las señales, etc.
3. *Extracción de características* con información importante y concerniente a la evaluación de la calidad de las señales de entrada.
4. *Selección y fusión de características* para reducir la dimensionalidad del problema e inferir información más significativa respecto a la calidad del proceso industrial observado.
5. *Clasificación* de las características finales seleccionadas en clases definidas por el diseñador o la *generación* de una *medida* o *índice* de la calidad.

2.1.5 Consideraciones generales sobre la inspección visual.

En los procesos de fabricación industrial la operación de inspección ha sido realizada tradicionalmente por un inspector humano: un operario con experiencia, especialmente instruido y entrenado en una tarea específica de inspección en la que compara ciertas características de un producto con las directrices de calidad dadas por el departamento.

La operación de inspección se puede dividir en cinco tareas secuenciales: *inicializar* (incluye ajustes y calibraciones), *acceder* (a la parte o producto a inspeccionar), *buscar* (para detectar defectos), *decidir* (comparación con las directrices para tomar la decisión) y *responder* (implementar físicamente la decisión). De todas ellas, las dos tareas que originan la mayoría de los errores durante la inspección son buscar y decidir [33].

Aunque hay muchos tipos de inspección, la tarea de inspeccionar generalmente suele ser de naturaleza visual. La inspección visual u ocular se puede definir como la observación de detalles para determinar la conformidad de una parte o producto final sin que exista de por medio medición alguna [34].

La inspección visual puede ser realizada por un operador humano, por un sistema automático o de forma híbrida [34]. La inspección visual híbrida trata de optimizar el proceso de inspección mezclando funciones aportadas por el hombre con funciones automatizadas. En la práctica, esta optimización es difícil de alcanzar, es más, puede empeorar los resultados de la inspección. El defecto o exceso de confianza del inspector sobre las funciones que se han automatizado pueden llegar a originar un aumento de las falsas detecciones.

Cuando la inspección visual es realizada por un operador humano la variabilidad del factor humano va a incidir de forma directa sobre el rendimiento de la inspección puesto que el inspector puede fallar en la detección de los defectos. En algunas tareas, sobre todo en aquellas en las que se inspecciona un gran número de elementos, los errores cometidos por el inspector están comprendidos entre el 10 y el 50 % [30]. Ciertos estudios han demostrado que la inspección visual humana tiene una efectividad del 80 % en el mejor de los casos [35].

El rendimiento de la inspección dependerá de factores relacionados con las características de la inspección (velocidad de la inspección, complejidad de la tarea, frecuencia, tipo y número de defectos, tiempo disponible para la inspección), el entorno donde se realiza (temperatura, humedad, ruido, vibraciones, iluminación, magnificación), la organización y estructura del trabajo (inspección individual, múltiples inspectores) y el estado físico y psicológico del inspector (motivación, experiencia, entrenamiento, estado de la percepción visual, edad, género, etc.) [36].

La migración de sistemas de inspección realizados por operadores humanos hacia sistemas de visión automatizados puede aumentar el rendimiento de la inspección visual eliminando aquellos factores que lo limitan. Así, se podrían ejecutar un mayor número de mediciones, más complejas, precisas y a mayor velocidad de las que podría hacer el inspector humano [37].

Por otro lado, estos sistemas también tendrían la ventaja de ser menos costosos, poder ser instalados en ubicaciones peligrosas para el ser humano (industria nuclear, química, etc.), un mayor grado de disponibilidad (funcionamiento 24 horas al día) y dar una medida del grado de calidad más objetiva, consistente, medible y mejorable [29] con la posibilidad de conectarse con sistemas de almacenamiento de información como servidores de datos continuos y bases de datos para la consulta de datos históricos y estadísticos.

2.2 INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADA.

A lo largo de los últimos años, la inspección visual automatizada¹ se ha convertido en un campo de estudio e investigación de creciente interés, muy dinámico y activo impulsado fundamentalmente por una mayor competitividad entre las empresas fabricantes y por los grandes avances alcanzados en diversos tipos de tecnologías [38].

Estas tecnologías, pertenecientes al ámbito sensorial y dispositivos (multiplicidad de cámaras, pequeñas cámaras inteligentes, tecnología CMOS de bajo coste, sistemas de iluminación mediante diodos LED, etc.), hardware para la computación y control (procesadores multi núcleo, unidades de procesamiento gráfico GPU, nuevas memorias DRAM y SRAM, dispositivos FPGA), metodologías y algoritmos de procesamiento de imagen (nuevas técnicas de codificación, procesamiento morfológico, métodos de transformación, comparación de imágenes, aprendizaje, análisis de bordes, etc.), inteligencia artificial (nuevas aplicaciones de redes neuronales, lógica borrosa, algoritmos genéticos, etc.), comunicaciones y transferencia de datos (TCP/IP, USB 2.0 y 3.0, Camera Link, GigE, Firewire, PCI express, etc.), han proporcionado elementos y dispositivos de mayor rendimiento a menor coste lo que ha dado lugar a la implementación de **sistemas de inspección visual automatizados (SIVA)** para casi cualquier tipo de área de aplicación. La proliferación de estos sistemas ha hecho de los SIVA que se integren, como un componente más, dentro de los esquemas de control de calidad de la inspección de productos y representen un factor clave para la identificación y eliminación de problemas en las diferentes etapas de los procesos de producción.

El diseño, desarrollo e implementación de un SIVA para una aplicación de inspección industrial requiere la incorporación de varias disciplinas. Así, además de la visión por computador como núcleo del sistema, la aplicación podría requerir de inteligencia artificial, instrumentación, electrónica, automática y control, comunicaciones y mecánica, entre otras, incrementando el nivel de complejidad del sistema SIVA.

La implementación de sistemas SIVA puede resolver problemas de inspección desde tres enfoques distintos [21, 39]:

1. *Geométrico*. Medición del tamaño y forma tanto en dos como en tres dimensiones. Se pueden realizar mediciones de distancias entre bordes, agujeros y esquinas; determinación de la forma de bordes y salientes; chequeo de la alineación y orientaciones de elementos; formas de cuerpos tridimensionales mediante visión estereoscópica, estéreo fotométrica, luz estructurada, etc.
2. *Estructural*. Detección de presencia y ausencia de elementos (agujeros, remaches, roscas, soldaduras, conectores, bloques terminales, etc.). Una vez que se localiza un objeto y disponiendo de una base de datos con información de las características que tiene el objeto se puede verificar si posee ciertas o todas las características especificadas.
3. *Superficial*. Determinación de la calidad de una superficie. Tanto en el caso de superficies planas como curvas se tratará de utilizar un determinado tipo de iluminación para detectar variaciones que determinen la existencia de manchas, arañazos, roturas, rugosidad y textura superficial, etc.

¹ Denominaciones en inglés para la inspección visual automatizada: *Automated Visual Inspection* (AVI) y *Automated Optical Inspection* (AOI).

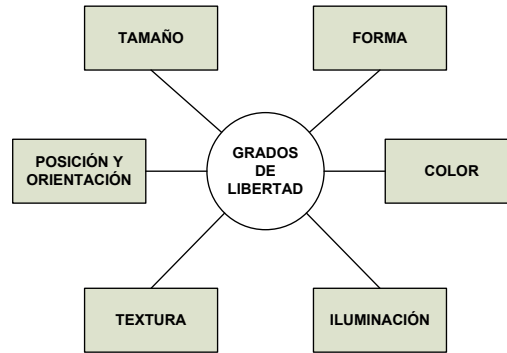


Figura 2.1: Grados de libertad.

En [40] se añade el enfoque *operacional* en el cual se trataría de determinar el grado de cumplimiento que una operación o proceso tiene respecto a los criterios establecidos en normativas y/o estándares de producción. Éste sería el caso, por ejemplo, de un proceso de soldadura láser en el que se quiere determinar si su ejecución se ajusta o no a la normativa.

Un aspecto importante de los SIVA es su *flexibilidad* para adaptarse a cambios y/o ampliaciones en las características de la tarea de inspección para la cual se diseñó originalmente el sistema [40]. Así, ciertos sistemas de inspección están diseñados para una aplicación con unas características determinadas y son incapaces de adaptarse a cambios que pueden producirse en las mismas (variaciones en la iluminación, posición y orientación, material a inspeccionar, tamaño de objetos, etc.). Por el contrario, otros sistemas disponen de la flexibilidad suficiente que les permite adaptarse a estos cambios y cumplir con la función de inspección de forma satisfactoria.

Las principales características que definen la flexibilidad de un sistema SIVA son denominadas grados de libertad del sistema de visión industrial por computador (figura 2.1). Las características más importantes que se consideran dentro de un entorno industrial son la posición y orientación, el tamaño, la forma, el color, la textura y la iluminación. Un sistema será más flexible y dependerá menos de la aplicación de inspección original cuanto mayor sea el número de grados de libertad que disponga y, al contrario, será menos flexible y más dependiente de la aplicación original cuanto menor sea el número de grados de libertad.

Por otro lado, una mayor flexibilidad del sistema de inspección tiene, generalmente, el inconveniente de aumentar la complejidad del mismo (incorporación de nuevos elementos hardware, algoritmos de procesamiento, etc.).

Con todo ello, el grado de flexibilidad del sistema de inspección será un compromiso entre flexibilidad, complejidad y coste económico del sistema.

2.2.1 Ventajas e inconvenientes de la inspección visual automatizada.

La inspección visual automatizada aporta una serie de características que la hacen muy atractiva frente a la inspección manual realizada por un operador humano [41]. A modo de resumen, las principales *ventajas* que puede aportar la inspección visual automatizada frente a la inspección humana son las siguientes:

- *Ubicación con menos restricciones.* Dentro de un proceso de producción es posible instalarlo en casi cualquier localización independientemente del espacio disponible y de las condiciones ambientales a las que esté sometido. La inspección manual realizada por un operador humano tendrá limitadas estas posibilidades, es más, a veces será imposible.
- *Objetividad, consistencia y robustez.* Las medidas realizadas por el sistema automático no van a tener la variabilidad y subjetividad inherente que sí tienen cuando la inspección es manual. De esta manera, la repetibilidad de la medición aumentará haciendo una inspección más consistente y robusta.
- *Precisión.* Mediante cámaras y ópticas de alta resolución y técnicas de procesamiento de imagen avanzadas permiten medidas de alta precisión.
- *Agilidad.* La utilización de sistemas automáticos permite que la inspección pueda ser realizada a mayor velocidad. Por un lado, reduce el tiempo que requeriría el operador humano para realizar la misma inspección y, por otro lado, la hace posible. Es decir, existen procesos en los que la inspección resultaría imposible para un operador humano por las velocidades del objeto a inspeccionar. Este es el caso de la inspección de bobinas de acero, papel, textil, madera, tarjetas PCB, etc.
- *Seguridad.* Con los sistemas de inspección visual automáticos, o bien se sustituye completamente al operador humano, o bien lo asisten en la tarea de la inspección. Tanto en un caso como en el otro no hay contacto entre el operador y el producto a inspeccionar eliminando completamente cualquier riesgo que ponga en cuestión la integridad del operador.
- *Versatilidad.* La integración de estos sistemas dentro del proceso productivo es relativamente fácil y permiten la realimentación de nuevas variables que son usadas para mejorar el proceso de producción.

Los *inconvenientes* fundamentales por los que un sistema de inspección visual automatizado no será siempre viable son:

- *Sin solución.* No existe una solución técnica para automatizar el proceso de inspección o no es posible alcanzar un rendimiento suficiente que supere al operador humano.
- *No amortizable económicamente.* La solución sí es posible pero el sistema no es amortizable considerando tanto el diseño, desarrollo, construcción e implementación como el mantenimiento que requiere una vez puesto en operación.
- *Solución insuficiente.* Hay solución y es viable pero no se ha alcanzado la consistencia, robustez y fiabilidad mínima requerida para su implementación.

Puede ser que, aun superando todos estos inconvenientes, el sistema una vez puesto en producción no cumpla las expectativas debido a factores que no se consideraron previamente durante su diseño u otro tipo de circunstancias (organizativas, políticas, etc.).

2.2.2 Consideraciones generales para un SIVA.

Cuando se pretende realizar el diseño e implementación de un SIVA y su posterior implantación en un proceso de inspección visual automática se deberán tener en cuenta una serie de consideraciones de índole práctica [21]:

- *Justificado.* No existe otra alternativa más barata y simple.
- *Especificaciones.* Las especificaciones del SIVA deben ser claras, concisas y estar completamente desarrolladas de acuerdo con el objetivo final.
- *Diseño.* Sencillo y viable. Si hay varios diseños se elegirá el más simple.
- *Implementación.* Hay que tener en cuenta que una gran parte del coste de desarrollo del sistema recaerá en hacer que el sistema funcione una vez instalado en la factoría.
- *Monitorización.* Es muy importante añadir al SIVA una interfaz con el operador humano para informar del funcionamiento sistema.

Una vez tenidas en cuenta estas consideraciones previas, todo SIVA deberá cumplir con los siguientes objetivos generales:

- *Preciso.* Mejorar la capacidad del operador humano.
- *Rápido.* Operar en tiempo real ya que, por lo general, los objetos y elementos a inspeccionar en líneas de producción se desplazan rápidamente.
- *Robusto.* Insensible al ambiente industrial: variación de la iluminación, vibraciones, polvo y suciedad, etc.
- *Completo.* No solamente debe ser capaz de identificar y localizar defectos, también debe suministrar información estadística sobre su funcionamiento para su posterior análisis.
- *Flexible.* Proporcionar las herramientas necesarias para permitir una reconfiguración sencilla y rápida del sistema de manera que pueda ser adaptado a nuevas condiciones de inspección.
- *Fiable.* Minimizar los errores cometidos por el sistema. Es decir, aquellos errores derivados de su propio funcionamiento que originan una respuesta equivocada del sistema que no se corresponde con la realidad (por ejemplo, clasificar como defecto algo que realmente no es defecto y viceversa).
- *Tolerante a fallos.* El fallo del SIVA debe ser detectado por sí mismo, generar las alarmas correspondientes y ejecutar las medidas necesarias para minimizar los problemas derivados del fallo (por ejemplo la realización de copias de seguridad de datos).
- *Mantenible.* El diseño del sistema contemplará la operaciones de mantenimiento que han de realizarse sobre el mismo. Así, deben ser fácilmente accesibles todas sus partes y elementos tanto a nivel del hardware como del software.
- *Económico.* El sistema debe estar más que compensado desde el punto de vista económico y tener un período de amortización lo más pequeño posible.

2.2.3 Clasificaciones de los sistemas SIVA.

Los sistemas SIVA pueden ser clasificados de varias formas atendiendo a una serie de características [29]:

- Geometría de la superficie a inspeccionar.
- Tipo de imagen adquirida.
- Técnica de detección empleada.

Clasificación según la superficie a inspeccionar.

Una primera clasificación puede establecerse en función de la geometría de las superficies que se van a inspeccionar [24]. Así, las superficies contenidas en el escenario pueden estar compuestas por *superficies cuadráticas*, es decir, superficies complejas que pueden modelarse mediante superficies (planos, esferas, cilindros, elipsoides, paraboloides, conos, etc.) o estar compuestas por *superficies irregulares* que no pueden ser modeladas a partir de funciones cuadráticas.

La mayoría de los sistemas SIVA operan dentro del ámbito de las escenas compuestas por superficies cuadráticas donde todos los objetos se encuentran identificados y sus posiciones son conocidas.

Clasificación según el tipo de imagen adquirida.

Una segunda clasificación de los sistemas SIVA puede realizarse atendiendo al tipo de datos usados para representar la imagen. Así, se pueden tener imágenes *binarias*, en *niveles de gris*, en *color* o imágenes *tridimensionales*.

La representación de una imagen en formato *binario* suele ser suficiente para realizar la inspección de muchos objetos industriales que solamente requieren del análisis de su silueta (análisis dimensional, defectos en bordes, formas, presencia o ausencia de elementos, etc.). El uso de imágenes binarias reduce la cantidad de datos que se necesitan procesar posibilitando el diseño de sistemas SIVA de alta velocidad de inspección. Por lo general, este tipo de sistemas suelen ser bastante económicos ya que requieren de sensores y sistemas de iluminación simples.

Cuando la información suministrada por una imagen binaria no es suficiente se requerirá un formato de la imagen que suministre más información. Este es el caso de la representación de imágenes en niveles de intensidad generalmente representadas en *niveles de gris*. Mediante este tipo de imágenes se pueden realizar inspecciones más complejas como son la inspección de superficies de objetos para localización de defectos, análisis de texturas, reconocimiento de caracteres, etc.

En otras aplicaciones se requiere el empleo de imágenes con información sobre el *color* o imágenes con *información 3D* ya que aportan información *extra* determinante para el éxito de la tarea de visión.

Clasificación según la técnica de detección empleada.

La inspección visual automatizada puede separarse en dos técnicas de detección: casamiento de patrones y extracción de características.

La primera técnica, denominada casamiento de patrones (*template matching*), consiste en comparar la imagen del objeto que se desea inspeccionar con una imagen ideal o plantilla de un objeto libre de errores o defectos. Esta comparación suele hacerse comparando píxel a píxel la imagen y la plantilla. Así, los objetos que casan bien con el modelo de la plantilla son considerados libres de defectos y pasan favorablemente la inspección.

La segunda consiste en la extracción de características (*extracting features*) de la imagen del objeto bajo inspección y compararlas con un listado de características o reglas que describen el modelo ideal. La mayoría de los sistemas industriales usan características y reglas basadas en áreas, perímetros, relación área-perímetro, área de agujeros y taladros, radio máximo y mínimo, etc. De igual modo, si todas las características o reglas son satisfechas el objeto se considerará que está libre de defectos. Una ventaja de esta técnica frente a la de casamiento de patrones es que no hay que mantener una gran base de datos de modelos, bastará con almacenar un vector o varios vectores de características o reglas. El inconveniente de esta técnica es su poca flexibilidad frente cambios en el diseño de los objetos.

A veces, se aplican *técnicas híbridas* de las dos técnicas anteriores aprovechando las ventajas inherentes de cada una de ellas o como una forma de complementarse para poder alcanzar el objetivo propuesto de la tarea de inspección.

2.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LOS SIVA.

En cierto modo, se podría argumentar que la visión industrial por computador es, por su propia naturaleza, inteligente ya que requiere de cierto grado de inteligencia para la interpretación de las imágenes [39].

La aplicación de la inteligencia artificial en la visión industrial por computador va a permitir solucionar problemas de clasificación, control, extracción de datos (minería de datos o data mining), diseño, diagnosis, modelado, optimización y predicción mediante el desarrollo de algoritmos de computación que imitan alguna forma de inteligencia natural. Muchos de los algoritmos de la inteligencia artificial usan reglas heurísticas para generar soluciones flexibles dentro del dominio industrial combinando algoritmos de procesamiento tradicionales con aproximaciones heurísticas [42].

La metodología heurística se podría definir como un procedimiento para resolver problemas matemáticamente bien definidos mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema puede ser interpretada y utilizada de forma inteligente para alcanzar una solución razonable [43].

Un problema estará bien definido cuando están definidas las posibles entradas, la forma de la solución y la función objetivo que se quiere lograr aunque no haya un método de solución evidente. Por otro lado, la interpretación y uso inteligente de la estructura del problema implica aprovechar un conocimiento previo disponible.

Las principales razones que pueden motivar el uso de métodos heurísticos en la solución de un problema pueden ser las siguientes [42]:

- El problema es tal que se desconoce alguna una solución analítica o iterativa.
- Aunque pueda existir alguna solución analítica o iterativa su implementación práctica puede ser imposible o computacionalmente costosa.
- Pueden garantizar una solución óptima.
- Pueden dar una buena solución aproximada inicial.

Dentro de las técnicas de inteligencia artificial más comunes aplicadas en el entorno de los sistemas de visión industriales se encuentran los sistemas expertos, el aprendizaje inductivo, la lógica borrosa, las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los algoritmos de recocido o temple simulado, algoritmos de optimización de enjambre o de colonia de hormigas y el método de optimización matemática de búsqueda de Tabú. La tabla 2.1 muestra las técnicas de inteligencia artificial que pueden aplicarse durante las etapas de procesamiento de imagen de un SIVA [39].

Como se verá posteriormente en el capítulo 8, la presente tesis aplica la inteligencia artificial durante la etapa de segmentación del algoritmo de procesamiento de imagen propuesto para la detección de óxido. En concreto, se construirá un modelo matemático empírico basado en redes neuronales. Este es el motivo por el que se desarrollará con mayor profundidad la sección 2.3.4 correspondiente con las redes neuronales.

	Métodos Conven.	Sistemas Expertos	Lógica Borrosa	Aprendiz. Inductivo	Redes Neuron.	Otras Técnicas
Mejora/Realce Imagen	Si		Si		Si	Si
Segmentación	Si		Si		Si	Si
Extracción Característ.	Si		Si	Si	Si	Si
Clasificación Elementos	Si	Si	Si	Si	Si	

Tabla 2.1: Técnicas de inteligencia artificial aplicadas en un SIVA.

2.3.1 *Sistemas expertos.*

Los sistemas expertos son algoritmos de computación que integran cierto conocimiento sobre un ámbito determinado para resolver problemas dentro de ese dominio.

La adquisición previa del conocimiento se realiza mediante observación directa o indirecta (transmisión del conocimiento por un experto) y por descubrimiento [44]. Los dos elementos fundamentales del sistema experto (figura 2.2) serán la *base de conocimiento* (que podrá estar compuesta por representaciones de preposiciones y predicados del tipo si-entonces, sentencias fácticas, redes semánticas, estructuras, objetos, procedimientos y casos) y el *mecanismo o motor de inferencia* (procedimiento que usa la base de conocimiento para determinar conclusiones y soluciones mediante la aplicación de procesos de control y estrategias de búsqueda).

Las mayores dificultades que pueden plantearse en el desarrollo de estos sistemas van a ser la adquisición del conocimiento dentro del ámbito del problema y/o la generación e implementación de las reglas usadas por la base de conocimiento [39].

El principal inconveniente que pueden tener este tipo de sistemas es su falta de adaptación a nuevas situaciones, o a cierta ampliación en el ámbito de aplicación, que no están contempladas dentro de la base de conocimiento lo que provoca una reducción de su rendimiento.

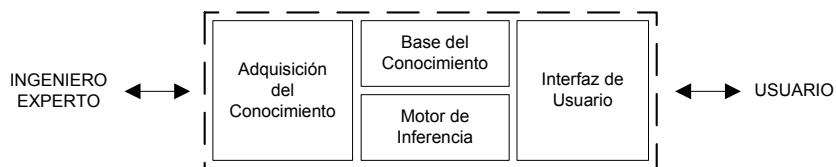


Figura 2.2: Sistema experto.

2.3.2 *Aprendizaje inductivo.*

El aprendizaje inductivo es una técnica automática para la adquisición del conocimiento en forma de reglas o árboles de decisión. Forma parte del campo del aprendizaje máquina (machine learning) y usa el análisis matemático de un conjunto de datos para generar su conocimiento.

Uno de los algoritmos más famosos usados para generar árboles de decisión es el ID3 inventando por Ross Quinlan. Este algoritmo crea un árbol de decisión a partir de los atributos de un conjunto de datos basándose en el concepto de entropía.

2.3.3 *Lógica borrosa.*

La utilización de la lógica borrosa es una técnica de la inteligencia computacional que puede hacer que los sistemas expertos alcancen la flexibilidad requerida para poderse adaptar a nuevas situaciones en su entorno. Una característica fundamental de esta técnica es que permite el tratamiento de información con un alto grado de imprecisión frente a la lógica convencional cuya información está bien definida y precisa.

Entre las principales motivaciones para usar la lógica borrosa caben destacar las siguientes ([45]):

- Conceptualmente es fácil de entender ya que el razonamiento borroso se basa en conceptos matemáticos sencillos.
- Es flexible puesto que se puede adaptar fácilmente a cambios e incorporar nuevas variables.
- Tolerante a la imprecisión de los datos.
- Permite modelar funciones no lineales.
- Al contrario que las redes neuronales, la lógica borrosa puede estar fundamentada en la experiencia de los expertos.
- Se puede combinar con técnicas convencionales.
- Basada en el lenguaje natural, la base de la comunicación humana.

Por estas y otras razones, ha sido aplicada con éxito en el control automático, clasificación de datos, análisis y toma de decisiones, sistemas expertos, visión por computador, etc. En el caso particular de la visión por computador la lógica borrosa se aplica en la mejora de imagen, detección de bordes, segmentación de la imagen, extracción de características y clasificación de elementos [46].

Básicamente, un sistema borroso transforma un espacio de entrada en uno de salida utilizando para ello la lógica borrosa. Esta transformación se realiza secuencialmente en tres etapas: fuzificación, mecanismo de inferencia difusa y defuzificación. Existen varios tipos de inferencia borrosa entre los que cabe destacar la inferencia borrosa de Mamdani [47] y la de Sugeno [48].

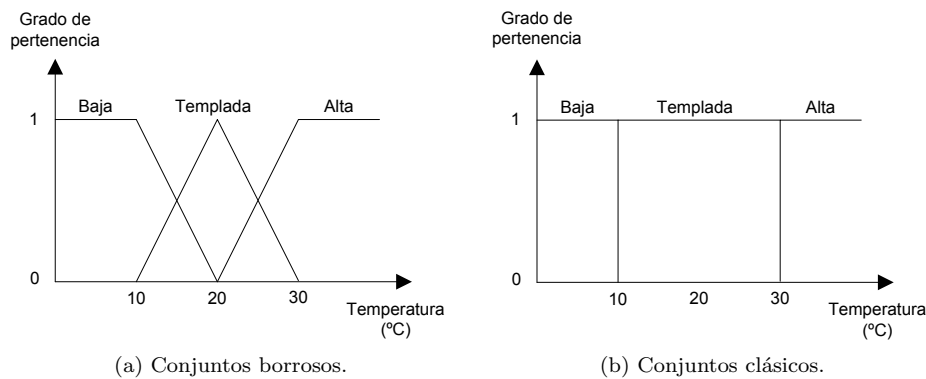


Figura 2.3: Clasificación de un objeto según su temperatura.

En la etapa de *fuzificación*, valores numéricos de variables son sustituidos por descripciones lingüísticas representadas por conjuntos borrosos donde es posible la pertenencia parcial a uno o varios de los grupos (figura 2.3a) en contraposición a los conjuntos clásicos donde no existe tal posibilidad (figura 2.3b). Por ejemplo, un objeto con una temperatura de 15 °C, que según un conjunto clásico tendría una temperatura *templada*, en un conjunto difuso sería parcialmente *frío* y *templado*.

Cada conjunto borroso queda definido por una determinada función de pertenencia de tal manera que asigna a cada valor de entrada un valor de salida comprendido entre 0 y 1 indicando el grado de pertenencia (0: nula pertenencia, 1: máxima pertenencia). Las funciones de pertenencia suelen ser, en general, funciones sencillas del tipo triangular, trapezoidal, sigmoideal y gaussiana.

El *mecanismo de inferencia difusa* es el procedimiento de razonamiento que permite que se establezcan conclusiones a partir de de premisas, es decir, relaciona conjuntos de entrada y de salida basándose, para ello, en una serie de sentencias cualitativas o reglas difusas. En el ejemplo de la figura 2.3a se podría expresar la siguiente sentencia:

Si temperatura es *alta* entonces rechazar pieza.

Finalmente, el proceso de *defuzificación* convertirá el resultado obtenido de la inferencia, que sigue siendo un conjunto difuso, en un resultado numérico concreto.

2.3.4 Redes neuronales.

Las redes neuronales son modelos computacionales del cerebro basados en una arquitectura paralelo-distribuida y que tienen la capacidad de aprender. Forman parte de la inteligencia artificial y han sido implementadas con éxito en numerosos tipos de aplicaciones de visión proporcionando buenas soluciones a problemas realmente complejos.

Al igual que en el aprendizaje inductivo, las redes neuronales pueden aprender el conocimiento dentro de un determinado dominio por medio de ejemplos pero, sin embargo, no puede almacenar el conocimiento adquirido de forma explícita (por ejemplo en forma de reglas o árboles de decisión) sino en forma de conexiones de neuronas ponderadas por un determinado peso.

Los comienzos de la neurocomputación se establecen en la década de los años cuarenta del pasado siglo a partir de un trabajo realizado por Warren McCulloch y Walter Pitts en 1943 y denominado *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity* [49] donde se mostraba que sencillas redes neuronales podían realizar cálculos aritméticos y lógicos. En 1949, Donal Hebb diseña la primera ley de aprendizaje para redes de neuronas artificiales [50].

Durante las décadas de los años 50 y 60 se produce un gran impulso en las redes neuronales iniciado por los trabajos de Frank Rosenblatt sobre un nuevo tipo de red neuronal denominada *Perceptrón* [51] que utilizaba una regla de aprendizaje con ajuste iterativo de pesos. En 1960, una mejora en la regla de aprendizaje fue introducida por Bernard Widrow y Marcian Hoff [52] sentando las bases del concepto de retro-propagación de redes multicapa.

Con el paso de los años Marvin Minsky y Seymour Papert demostraron en 1969 ciertas limitaciones en el aprendizaje del perceptrón monocapa como por ejemplo su incapacidad para aprender la función lógica *XOR* [53].

A principios de la década de los setenta, Teuvo Kohonen y James Anderson presentaron unos trabajos relacionados con tipos de redes de memoria asociativa [54] que con el paso de los años dieron lugar a las redes autoorganizadas [55].

En los años 80, John Hopfield presentó varias redes neuronales con pesos fijos y activaciones que podían resolver problemas de optimización combinatoria tales como el conocido problema del viajante [56, 57] dando lugar a un auge renovado en el campo de la neurocomputación. En 1987 se celebró la primera conferencia abierta sobre redes neuronales con más de 1700 participantes y se formó la *International Neural Network Society* (INNS). Un año más tarde se funda la revista *Neural Networks* y en los dos años siguientes la *Neural Computation* y la *IEEE Transactions on Neural Networks*.

Hoy en día las redes neuronales son aplicadas para resolver numerosos problemas de distinta índole siendo algunas de las operaciones más comunes las siguientes [58]:

- *Clasificación*. Un patrón de entrada se pasa a la red obteniéndose como salida una clase representativa.
- *Casamiento de patrones*. Un patrón de entrada se pasa a la red obteniéndose el patrón de salida que mejor casa con el patrón de entrada.
- *Complementación de patrones*. Un patrón de entrada incompleto se pasa a la red obteniéndose un patrón de salida que contiene la porción que lo completa.
- *Eliminación de ruido*. Se hace pasar por la red un patrón de entrada con ruido y la salida que se obtiene es el patrón de entrada al que se le ha eliminado casi o completamente el ruido.
- *Optimización*. Se introduce en la red un patrón de entrada que representa los valores iniciales para un determinado problema de optimización obteniéndose como salida un conjunto de variables que representan una solución optimizada aceptable al problema.
- *Control*. Se introduce en la red un determinado patrón de entrada que representa el estado actual de un controlador conjuntamente con la respuesta deseada del sistema y la red genera una salida que representa la secuencia de comandos que hay que aplicar para obtener la respuesta deseada.

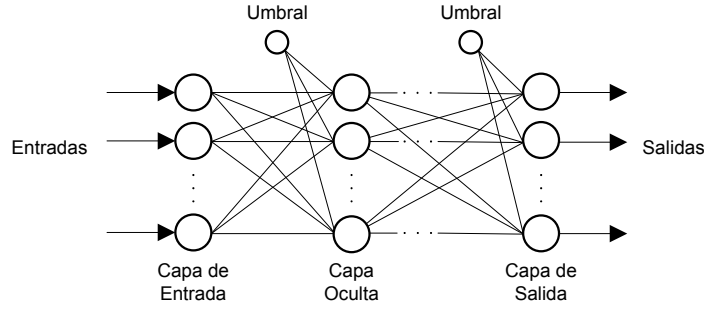


Figura 2.4: Modelo neuronal.

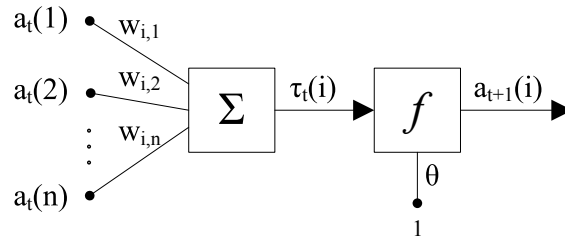


Figura 2.5: Componentes básicos de una neurona.

- *Simulación.* Un patrón o serie de patrones de entrada que representan el vector actual de estado de un sistema (y vectores de estado anteriores) o una serie temporal es presentado a la red y ésta genera secuencias estructuradas o patrones que simulan el comportamiento temporal del sistema.

Hay muchos tipos de redes neuronales diferenciadas entre sí por el tipo de conectividad entre los diferentes elementos que forman la red y las características individuales de cada elemento, los pesos de las conexiones y las reglas de aprendizaje o entrenamiento. Los modelos basados en redes neuronales asumen que la computación se distribuye sobre varias unidades de procesamiento simples llamadas neuronas que se interconectan entre sí operando en paralelo (figura 2.4).

Todos los tipos de redes neuronales tienen en común los siguientes componentes básicos [46] (figura 2.5):

- Un número finito de neuronas $a(1), a(2) \dots a(n)$ cuyo valor individual depende de un determinado instante de tiempo t . Así, el valor de cada neurona se representará como $a_t(i)$.
- Un conjunto finito de conexiones neuronales $W = (w_{ij})$, donde w_{ij} representa la fuerza de la conexión entre la neurona $a(i)$ y la neurona $a(j)$.
- Una regla de propagación $\tau_t(i) = \sum_{j=1}^n a_t(j) w_{ij}$.

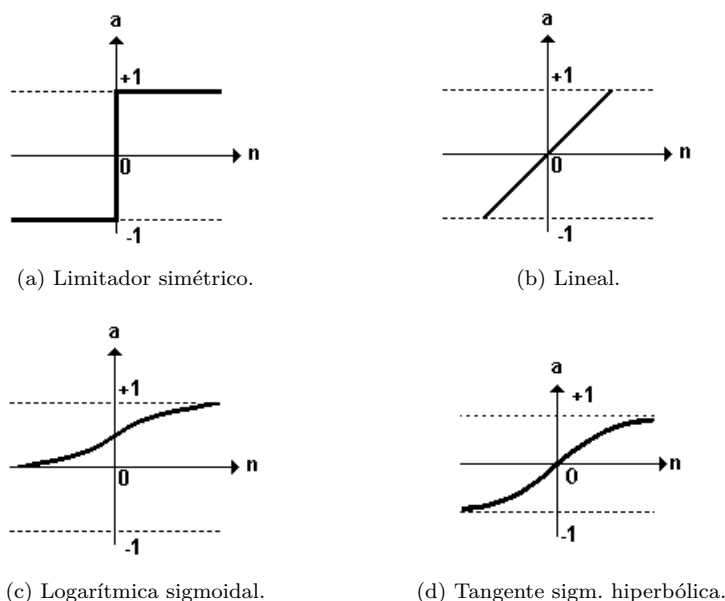


Figura 2.6: Tipos de funciones limitadoras o de transferencia más comunes.

- Una función de activación f que toma el valor de τ como entrada y produce el siguiente estado de la neurona $a_{t+1}(i) = f(\tau_t(i) - \theta)$ donde θ es un valor de umbral (denominado bias, en inglés) y f una función limitadora, umbralizadora, gaussiana o sigmoideal que introduce una alinealidad en la red. Entre los tipos de funciones limitadoras más empleadas se encuentran las siguientes:
 - Limitador fuerte simétrico (figura 2.6a).
 - Lineal (figura 2.6b).
 - Logarítmica sigmoideal (figura 2.6c).
 - Tangente sigmoideal hiperbólica (figura 2.6d).

Las redes neuronales pueden ser *monocapa* o *multicapa*. En una red neuronal *monocapa* las neuronas que la componen establecen conexiones laterales, cruzadas o auto-recurrentes en la única capa o nivel² que constituye la red. Las redes *multicapa* disponen de conjuntos de neuronas agrupadas en varios niveles o capas.

Otra clasificación de las redes neuronales está basada en la forma de propagación de las señales dentro de la red. Así, se tendrán redes propagadas hacia adelante o *feedforward* (las señales fluyen en una única dirección desde la entrada a la salida de la red neuronal de tal manera que la salida de una neurona determinada nunca podrá ser entrada de sí misma, de una neurona del mismo nivel o de neuronas de niveles precedentes), y redes con propagación hacia atrás o *backpropagation* (sí es posible la realimentación de señales entre neuronas de la misma capa).

² Conjunto de neuronas caracterizadas porque sus entradas tienen el mismo origen y sus salidas el mismo destino.

La capacidad de *aprender* de una red neuronal se basa en la aplicación de un determinado mecanismo de aprendizaje. El aprendizaje de una red neuronal se define como el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos w_{ij} en respuesta a una información de entrada. El proceso de aprendizaje finaliza cuando los valores de los distintos pesos permanecen estables. Una vez finalizado los cambios que han podido darse en la red original serán la creación (cambio en el valor del peso de $0 \rightarrow \neq 0$), modificación o destrucción (cambio del valor del peso $\neq 0 \rightarrow 0$) de las conexiones entre neuronas.

Según la forma del proceso de aprendizaje las redes neuronales pueden ser clasificadas de otras formas diferentes. Así, se puede realizar una clasificación basada en el momento en el que se realiza el aprendizaje: con la red neuronal fuera de operación o durante su funcionamiento habitual. Otra clasificación puede establecerse considerando si el proceso de aprendizaje es supervisado o no supervisado por un agente externo.

En el proceso de *aprendizaje supervisado* el agente externo comprueba la salida de la red y, en caso de no coincidir con el valor deseado, procede a modificar los pesos de las conexiones según una serie de criterios [59, 60]. De esta forma se tienen los siguientes tipos de aprendizaje:

- *Por corrección de error*. El ajuste de pesos se realiza en función del error con la salida.
- *Por refuerzo*. Considerando el valor de salida como éxito o fracaso según valores previamente establecidos para el éxito y para el fracaso. El ajuste de pesos se realizará cuando se produzca un fracaso en la salida.
- *Estocástico*. Producir cambios aleatorios en la red y evaluar si los resultados obtenidos se asemejan a los deseados.

Ejemplos de tipos de redes neuronales con aprendizaje supervisado son el perceptrón, el perceptrón multicapa (MLP: Multi Layer Perceptron), las redes Adaline (ADaptative LINear Element) y Madaline (Multiple Adaline), las redes de funciones de base radial (RBF: Radial Basis Functions), las redes de regresión generalizada (GNR; Generalized Net Regression) y las redes neuronales probabilísticas (PNN: Probabilistic Neural Nets) [61, 62].

Si las redes no requieren la influencia del agente externo para ajustar los pesos de las conexiones entre las neuronas se tendrá un *aprendizaje no supervisado*. En este caso la red no recibe información sobre si la salida generada es correcta o no. De esta manera se tienen los siguientes tipos de aprendizaje:

- *Hebbiano*. Ajuste de pesos de las conexiones según la correlación existente entre dos neuronas. Así, si son activas ambas conexiones se producirá un reforzamiento de la conexión y si hay alguna inactiva se producirá un debilitamiento.
- *Competitivo y cooperativo*. Las neuronas compiten y cooperan entre ellas para realizar una determinada tarea. El objetivo de este tipo de aprendizaje es la activación de una sola neurona o una perteneciente a un grupo de neuronas determinado. Mediante este tipo de aprendizaje se pretende categorizar los datos que son introducidos en la red neuronal clasificándolos en distintas categorías las cuales son creadas por la propia red.

Tipos de redes neuronales con aprendizaje no supervisado son el mapas autoorganizados de características de Kohonen (SOFM: Self-Organising Feature Map) y red de resonancia adaptativa (ART: Adaptative Resonance Theory) [61, 62].

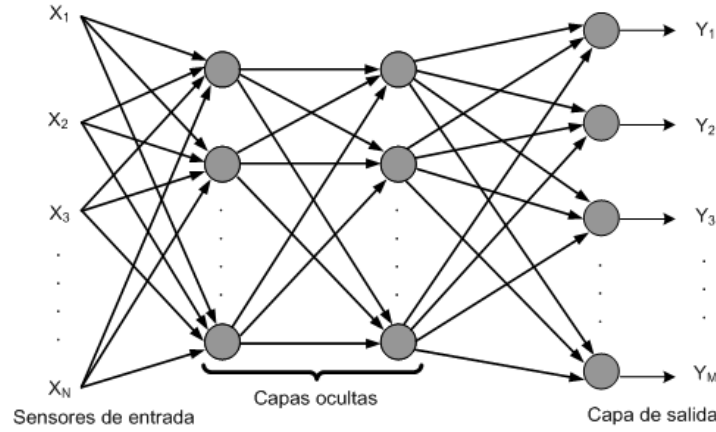


Figura 2.7: Arquitectura del MLP.

El perceptrón multicapa.

El *MLP* es una de las redes neuronales más conocidas [63]. Se trata de una red de alimentación hacia adelante (feedforward) donde los espacios de entrada y salida son mapeados estáticamente (el espacio de salida en un instante determinado es una función del espacio de entrada en ese mismo instante). El *MLP* está formado por múltiples capas de neuronas, que permite resolver problemas que no son linealmente separables, principal limitación del perceptrón simple y es un conocido aproximador universal, que se utiliza frecuentemente como método de estimación [64].

Está compuesto por una capa de sensores de entrada, otra capa de neuronas de salida y un número determinado de capas intermedias, denominadas capas ocultas debido a que no tienen conexiones con el exterior. Cada sensor de entrada está conectado con las unidades de la primera capa oculta que, a su vez, están conectadas con las unidades de la segunda capa, y así sucesivamente (figura 2.7).

La función implementada por un *MLP* con sólo una capa oculta será la siguiente:

$$Y_i = g_1 \sum_{j=1}^M [w_{ij} \cdot s_j] = g_1 \sum_{j=1}^M \left[w_{ij} \cdot \left(g_2 \sum_{r=1}^L t_{jr} \cdot x_r \right) \right] \quad (2.1)$$

donde w_{ij} es el peso sináptico de la conexión entre la unidad de salida i y la unidad de proceso j de la capa oculta; L es el número de unidades de proceso de la capa oculta; g_1 es la función de transferencia de las unidades de salida; w_{jr} es el peso sináptico que conecta la unidad de proceso j de la capa oculta con el sensor de entrada r y g_2 es la función de transferencia de las unidades de la capa oculta.

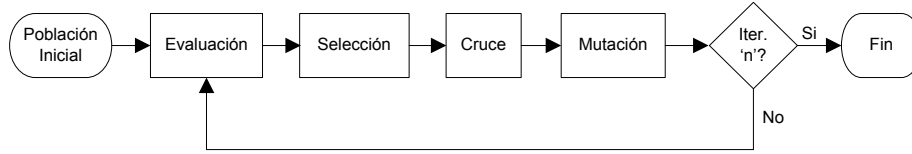


Figura 2.8: Ciclo operativo de un algoritmo genético.

El objetivo del *MLP* es establecer una correspondencia entre un conjunto de entradas X_1, X_2, \dots, X_N y un conjunto de salidas deseadas Y_1, Y_2, \dots, Y_N de tal manera que

$$(X_1, X_2, \dots, X_N) \in \mathbb{R}^N \rightarrow (Y_1, Y_2, \dots, Y_N) \in \mathbb{R}^M \quad (2.2)$$

Para alcanzar este objetivo, se realizará el entrenamiento de la red mediante un conjunto p de patrones de entrenamiento donde se conoce perfectamente que al patrón de entrada $(X_1^k, X_2^k, \dots, X_N^k)$ le corresponde la salida $(Y_1^k, Y_2^k, \dots, Y_N^k)$. Así, el conjunto de entrenamiento será:

$$(X_1^k, X_2^k, \dots, X_N^k) \rightarrow (Y_1^k, Y_2^k, \dots, Y_N^k) : k = 1, 2, \dots, p \quad (2.3)$$

2.3.5 Otras técnicas.

Los algoritmos genéticos, el algoritmo de enjambre o colonia de hormigas y la búsqueda tabú son técnicas de optimización inteligente basadas en encontrar soluciones entre un gran número de posibles soluciones de manera rápida.

Un *algoritmo genético* (figura 2.8) es una herramienta de optimización que busca una solución a un problema dentro de un espacio de búsqueda determinado basándose en la teoría de la selección natural donde los animales mejor adaptados sobreviven y se reproducen. En esta técnica, las posibles soluciones de un problema se representan mediante genes o cromosomas de los cuales sobreviven y pasan a la siguiente generación o iteración aquellos que determina una función de ajuste o adaptación. La reproducción se realiza creando un nuevo cromosoma a partir del cruce de dos cromosomas existentes. La diversidad en la población se mantiene mediante otra operación denominada mutación en la que se selecciona un cromosoma al que se le invierte uno de sus elementos. El proceso iterativo finaliza cuando se alcanza un número n de iteraciones o un determinado nivel de ajuste.

El *algoritmo de enjambre* trata de imitar ciertos aspectos o comportamientos característicos de las colonias de insectos para encontrar soluciones óptimas dentro de un conjunto discreto de soluciones.

La *búsqueda tabú* es otra técnica que trata de encontrar la mejor solución de forma iterativa. En cada iteración se elegirá la solución que consigue una mayor puntuación según una función de valoración y se determinará qué soluciones entran y salen de la lista Tabú (contiene aquellas soluciones excluidas de la siguiente búsqueda) según un determinado criterio.

2.4 VISIÓN POR COMPUTADOR: CONCEPTO Y APLICACIONES.

La visión artificial o visión por computador (denominada en inglés *computer vision*) es una ciencia que tiene por objeto reproducir artificialmente el sentido de la vista mediante el proceso de extracción de información del mundo físico a partir de imágenes utilizando para ello un computador. En la visión por computador se trata de describir el mundo que vemos en una o varias imágenes y reconstruir sus propiedades: cómo están distribuidas las formas, la iluminación y los colores [65]. Los datos de la imagen pueden venir dados en muchos tipos de formatos como son las secuencias de video, vistas de múltiples cámaras o datos multidimensionales como son los escáneres médicos.

Desde un punto de vista más práctico, un sistema de visión por computador es un sistema autónomo que realiza algunas de las tareas que el sistema de visión humano o animal realiza. Estas tareas pueden ser simples, como la detección de objetos sencillos dentro de una imagen, y complejas, como la interpretación tridimensional de escenas complejas [66].

La visión por computador se encuentra relacionada con otros campos y disciplinas [67] (ver figura 2.9). Por ejemplo, la visión por computador transforma en datos las imágenes a los que posteriormente aplica métodos de procesamiento de imagen y señales. También hace uso de la geometría, la teoría de la probabilidad y estadística y de técnicas de optimización, entre otras, dentro del campo de las matemáticas.

El reconocimiento de patrones a través del aprendizaje máquina se realiza aplicando técnicas pertenecientes a la inteligencia artificial como la lógica borrosa, redes neuronales y algoritmos genéticos; el diseño y desarrollo de sensores usados en la visión por computador basándose la física de estado sólido, la explicación de la propagación de la luz desde el campo de la óptica hasta llegar al entendimiento de la visión biológica y humana dentro del campo de la neurobiología.

En la industria y los procesos de fabricación se habla de visión industrial por computador o *machine vision* como la implementación de la visión por computador en aplicaciones industriales. Por último, el uso de pequeños sistemas de sensado de imagen integrados denominados cámaras inteligentes que proporcionan características que van más allá de las que puede dar un simple sensor y a un coste relativamente pequeño.

La evolución de la visión por computador comienza en la década de los sesenta del pasado siglo XX y no ha parado de crecer desde entonces. Los primeros sistemas de visión por computador aparecieron a mediados de los sesenta en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) [68, 69]. En 1968 apareció el primer artículo de la publicación de *Journal on Pattern Recognition*, en 1969 el primer texto [70] y en 1970 la primera conferencia internacional en reconocimiento de patrones (*International Conference in Pattern Recognition*).

Durante los siguientes años la evolución de esta disciplina continuó; en 1978 se formó la primera asociación internacional para el reconocimiento de patrones (*International Association for Pattern Recognition*) y en 1979 la primera publicación en el IEEE³ bajo el nombre *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.

3 Institute of Electrical and Electronics Engineers.

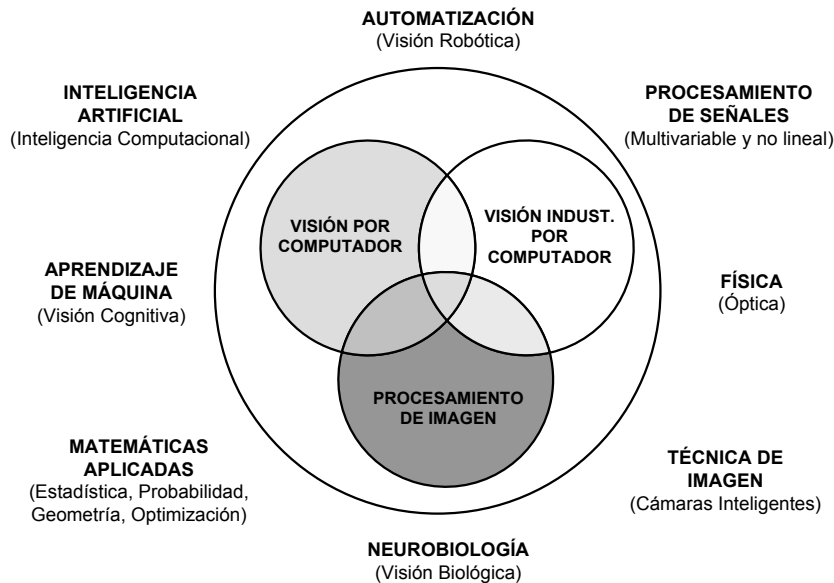


Figura 2.9: La visión por computador y su relación con otras disciplinas.

Los primeros trabajos sobre visión por computador [71, 72, 73], tal y como se conoce hoy en día, no se produjeron hasta la década de los ochenta conjuntamente con la aparición de las primeras computadoras que procesaban gran cantidad de datos y la primera conferencia internacional sobre la visión por computador tuvo lugar en 1987.

En [65] viene un desarrollo muy completo de los principales avances producidos en la visión por computador desde la década de los sesenta del siglo pasado hasta la época actual y en <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/> viene un compendio sobre la visión por computador editado por R. B. Fisher de la Escuela de Informática de la Universidad de Edinburgo. Azriel Rosenfeld en [74] también realiza un desglose bibliográfico hasta 1999 sobre técnicas, aplicaciones y conceptos relacionados con el procesamiento de imagen y la visión por computador.

Hoy en día, la visión por computador es ampliamente usada en una gran variedad de aplicaciones (pueden encontrarse un desarrollo más amplio de ellas en <http://www.cs.ubc.ca/spider/lowe/vision.html> y en [75]). Así, a modo de ejemplo, se muestran las siguientes:

- *Reconocimiento óptico de caracteres* (OCR, *optical character recognition*): lectura de códigos postales escritos a mano en cartas [76] y reconocimiento automático del número de placa de vehículos (ANPR) [77].
- *Inspección automática*: inspección de calidad de frutas [78, 79], inspección de cápsulas de gelatina en industria farmacéutica [80], determinación de la calidad de soldadura láser [81], etc.
- *Robótica*: navegación y detección de distancias en el entorno de movimiento del robot, identificación de objetos, control de brazos robotizados, etc. [82, 83, 84, 85].

- *Cartografía, Arquitectura y Arqueología*: generación de planos cartográficos para identificación de límites y áreas de superficies y trazado de carreteras [86], reconstrucción completa automatizada de modelos 3D mediante fotografía aérea [87], generación de modelos y reconstrucción 3D de excavaciones, edificios y monumentos, etc [88].
- *Medicina*: registro de imágenes para el preoperatorio o durante intervenciones quirúrgicas [89], estudios de la evolución morfológica del cerebro [90], radiología [91], tomografía computerizada [92], etc.
- *Microscopía y teledetección*: tratamiento de imágenes microscópicas para la clasificación de cromosomas, conteo de células, detección de patologías, etc. [93, 94, 95]; y macroscópicas para el análisis terrestre [96], condiciones atmosféricas [97], estudios varios sobre imágenes tomadas de otros planetas [98] y cuerpos estelares [99], etc.
- *Seguridad en vehículos de automoción*: detección de obstáculos con el automóvil donde otro tipo de tecnologías no funcionan bien [100], etc.
- *Vigilancia y seguridad*: detección de intrusos [101], análisis facial [102], acceso a zonas restringidas mediante identificación por huellas dactilares [103] y retina [104], análisis del estado del tráfico [105], etc.
- *Captura de movimiento* (motion capture, mocap): utilización de marcadores retro-reflectivos sobre una persona para la captura de posición y movimientos en animación [106].

2.4.1 Etapas de la visión por computador.

Para llevar a cabo una determinada tarea de visión, un sistema de visión por computador aplica una serie de pasos o etapas de procesamiento de datos para obtener información sobre el problema a resolver.

En la figura 2.10 se muestra una secuencia general de las etapas que integran este procesamiento desde las de menor nivel, agrupadas en lo que se denomina visión de bajo nivel y que suelen tener un procesamiento más simple, hasta las de mayor nivel o visión de alto nivel que resultan ser las de procesamiento más complejo.

El límite que determina qué etapas son consideradas de bajo y de alto nivel no está claramente definido aunque puede establecerse como viene en la figura 2.10. Hay autores que agrupan las etapas en tres niveles de procesamiento definiendo un tercer nivel intermedio entre los dos definidos anteriormente [21].

Según la tarea de visión concreta se requerirá la ejecución secuencial de todas o solamente algunas de las etapas en un orden que, por lo general, suele ser desde las de menor nivel hasta las de mayor nivel. Ciertas tareas requerirán la aplicación de una estrategia diferente para la resolución del problema de visión: de mayor nivel a menor nivel, mixtas, iterativas o con realimentación, etc. El objetivo de cada una de estas etapas puede describirse como sigue:

1. *Adquisición de imagen*. Plasmar en una imagen digital de dos dimensiones el mundo real tridimensional. Dentro de esta etapa estaría el muestreo, la discretización y el almacenamiento digital de la imagen.
2. *Preprocesamiento*. Preparar y adecuar la imagen para el procesamiento posterior en siguientes etapas (realce, suavizado, restauración, etc.).



Figura 2.10: Etapas en el proceso de visión por computador.

3. *Segmentación*. Detectar las discontinuidades dentro de la imagen (operadores de primera y segunda derivada, morfológicos, etc.) que ayuden a determinar regiones que comparten determinadas características (textura, color, nivel de gris, etc.).
4. *Descripción*. Representar matemáticamente los objetos segmentados previamente.
5. *Reconocimiento y localización de objetos*. Clasificar los objetos por clase o prototipo cuyas características se asemejen a las del objeto (distancias, patrones, formas, etc.) y localizar el objeto dentro del espacio tridimensional (técnicas de triangulación, restricciones al espacio, etc.).
6. *Interpretación*. Interpretar la escena a partir de la información disponible obtenida de etapas anteriores. Con los resultados obtenidos de la interpretación se alcanzará el objetivo final de la tarea de visión propuesta (navegación autónoma de robots, reconocimiento de objetos, predicción de movimiento, datos para brazos robotizados, etc.).

En [107] se puede encontrar un desglose de las principales técnicas de procesamiento empleadas en las etapas de preprocesamiento, segmentación, descripción, reconocimiento y localización de objetos e interpretación.

2.5 VISIÓN INDUSTRIAL POR COMPUTADOR.

La visión industrial por computador o *machine vision* es la aplicación de la visión por computador en los procesos de fabricación industriales. Una definición más formal podría ser la siguiente [42]:

El uso de dispositivos de sensado óptico sin contacto para recibir e interpretar de forma automática una imagen de una escena real con la finalidad de obtener información y/o controlar máquinas o procesos.

La asociación internacional *AIA*⁴ define el concepto *machine vision* como:

Toda aplicación de carácter industrial o no donde una combinación de hardware y software, basada en la captura y procesamiento de imágenes, asiste operativamente a ciertos dispositivos en la ejecución de sus funciones. Típicamente integra sistemas de iluminación, elementos ópticos, cámaras, tarjetas capturadoras o interfaces procesadoras y software que procesa los datos digitalizados para generar una respuesta

Aunque la visión industrial por computador está relacionada con los objetivos tradicionales de la visión por computador ha evolucionado de forma diferente como una disciplina separada. Así, la visión industrial por computador no solamente concierne a la adquisición de la imagen y su procesamiento sino también a la integración e interconexión con los equipos industriales, procesos y la estructura general de la factoría y empresa haciendo uso, para ello, de la ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, ingeniería de sistemas, ciencias de la computación y tecnologías de la información [108]. El éxito del sistema de visión dependerá del conocimiento que se tenga de todas las disciplinas que lo integran [109].

La buena aceptación que están teniendo los sistemas de visión industriales por computador hace que su diversificación a nivel industrial sea muy rápida. Así, pueden verse este tipo de sistemas en industrias tales como la aeroespacial, del automóvil, electrónica, farmacéutica, biomédica, semiconductores, alimentaria y bebidas, etc. [110]. Algunas aplicaciones industriales en las que la visión industrial por computador ha sido aplicada con éxito son:

- Ensamblaje de elementos y partes [111, 112].
- Procesos de fabricación en la industria alimentaria [113, 114].
- Inspección:
 - Cerámica y cristal [115, 116, 117].
 - Partes y elementos [118, 119, 120].
 - Componentes electrónicos [121, 122].
 - Pantallas LCD, plasma y TFT [123, 124].
 - Cuero y piel [125].
 - Papel [126].

⁴ *Automated Imaging Association*: mayor asociación a nivel mundial de empresas relacionadas con los sistemas de visión automatizados que aglutina a fabricantes de cámaras e iluminación, empresas de software de visión, integradores de sistemas, distribuidores y otros fabricantes de componentes y sistemas para la visión automatizada (Adept, Addlink, Anafocus, Allied Vision, Balluf, Banner, Baumer, CCS America, Cognex, Hamamatsu, Infaimon, Jenoptik, Mathworks, Matrox, National Instruments, Texas Instruments, etc.).

- Tarjetas de circuito impreso [127, 128, 129].
- Soldaduras [130, 131].
- Acero, aluminio y otros metales [132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 26, 143, 144, 145, 146, 147, 27, 148].
- Textil [149, 150, 151].
- Madera [152, 153].
- Industria farmacéutica [154].
- Reconocimiento e identificación de elementos [155, 156].
- Control de procesos:
 - Pulverización de pintura [157].
 - Control de maquinaria [158].
 - Control de robots [159, 160].
 - Seguimiento y control de procesos de soldadura [161, 162, 163].
- Resistencia estructural, detección de roturas, construcción y transporte [164, 165, 166].
- Ingeniería inversa (generación de dibujos CAD a partir de imágenes de piezas mecánicas, edificios, etc.) [167, 168].
- Etc.

2.5.1 *Arquitectura básica de un sistema de visión industrial.*

La arquitectura básica de un sistema de visión industrial por computador [169, 170] está compuesta por una serie de elementos (figura 2.11) que funcionan conjuntamente con el objetivo final de realizar la toma de decisiones (identificar un objeto, obtener su posición, encontrar defectos, etc.).

El conjunto cámara-óptica adquiere una imagen del objeto iluminado que se desea identificar o inspeccionar. En general, la adquisición de la imagen se puede realizar de forma pasiva, iluminando la escena mediante la luz natural proveniente del sol, y de forma activa, mediante una fuente de luz artificial. En aplicaciones de visión industrial es más adecuado este último método siendo la elección de la fuente de luz artificial un factor muy importante. Dependiendo del tipo de aplicación se podrán emplear distintos tipos de fuentes (lámparas, diodos LED, fuentes de emisión láser, etc.) donde los factores más importantes para su elección serán la longitud de onda de la fuente que va a iluminar la escena (espectro visible, infrarrojo, ultravioleta, rayos-X, etc.), la técnica de iluminación empleada (directa, difusa, a contraluz, coaxial, estructurada, campo oscuro, polarizada, etc.) y el tipo de luz (incoherente, fuente más genérica y económica; o coherente, fuentes más costosas para aplicaciones más específicas).

El sistema de iluminación es esencial en los sistemas de visión industriales puesto que de él depende, en gran parte, el éxito de la tarea de visión [171]. Así, una buena iluminación y una adecuada selección de la lente facilita la captura de una imagen de calidad y características óptimas para el procesamiento y análisis posterior.

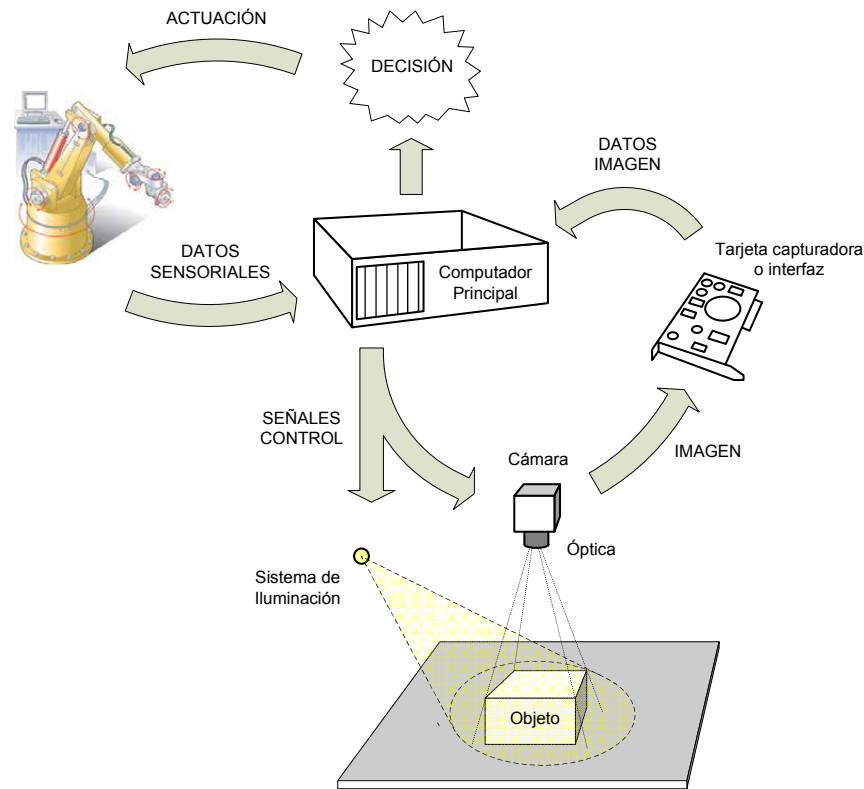


Figura 2.11: Elementos de un sistema de visión industrial por computador.

El método de captura es otro de los aspectos importantes a considerar. Así, la adquisición puede realizarse con una o varias cámaras (por ejemplo la visión estéreo). Para obtener la imagen óptica se requiere de un fotodetector (CCD, CMOS, etc.) que convierte la señal óptica en una señal eléctrica. El tipo y características del fotosensor son también muy importantes para la obtención de una imagen de calidad.

Las imágenes adquiridas por la cámara son digitalizadas, en su caso, o transferidas al computador principal por medio de tarjetas capturadoras o de interfaz. Una vez en éste, las imágenes son procesadas mediante algoritmos específicos diseñados e implementados para la tarea de visión encomendada. El computador principal también actuará como controlador del sistema de iluminación y de la cámara (ajuste de la iluminación, disparo de la cámara e iluminación, etc.).

Una vez realizado el procesamiento de imagen, el computador principal tomará la decisión o decisiones objetivo de la tarea de visión que serán utilizadas para actuar sobre proceso de fabricación, el sistema de control (Robots, PLC, etc.). En algunos casos el sistema de visión requerirá de información proveniente del sistema sensorial (encoders lineales o rotativos, presencia o no de objetos, materiales, etc.) para acometer la tarea de visión.

Desde el punto de vista de la adquisición y procesamiento, las etapas realizadas por un sistema de visión industrial por computador para poder alcanzar el objetivo propuesto son las siguientes [40][39]:

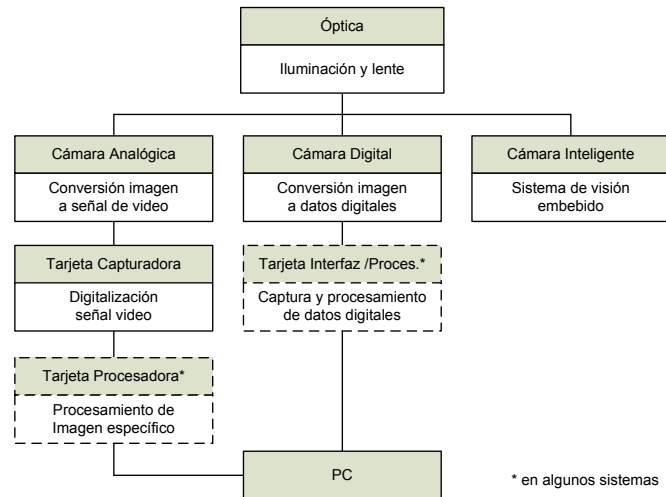


Figura 2.12: Sistema de visión industrial por computador.

1. *Adquisición de imagen.* Obtención de la imagen en formato digital que contiene la información requerida del objeto o elemento que va a ser inspeccionado mediante cámaras y tarjetas captadoras o de interfaz.
2. *Mejora y realce de imagen.* Mejora de la calidad de la imagen para facilitar el procesamiento posterior aplicando diversas técnicas de eliminación de ruidos, reflejos, mejora del contraste, corrección de distorsiones introducidas por la óptica, etc.
3. *Segmentación.* División de la imagen entre áreas de interés y fondo de la imagen. El resultado de esta etapa se denomina imagen segmentada donde los objetos o elementos representan las áreas de interés.
4. *Extracción de características.* Aplicación de técnicas de procesamiento de imagen para la extracción de información que caracteriza al objeto o elemento (tamaño, posición, bordes y contornos, textura, etc.) de manera que ayude a la clasificación y toma de decisiones posterior.
5. *Clasificación y/o interpretación.* Determinación de lo que representa cada objeto o elemento dentro de la imagen. En esta etapa suele realizarse la combinación de características para la reducción dimensional del espacio de decisión a la dimensión intrínseca del problema.
6. *Toma de decisiones.* Una vez reducida la dimensionalidad se procesa hasta alcanzar la decisión final (aceptación o rechazo, determinación de la calidad, identificación y reconocimiento, actuación a realizar, etc.).

Los sistemas de visión industrial por computador vienen implementados de muchas formas (figura 2.12).

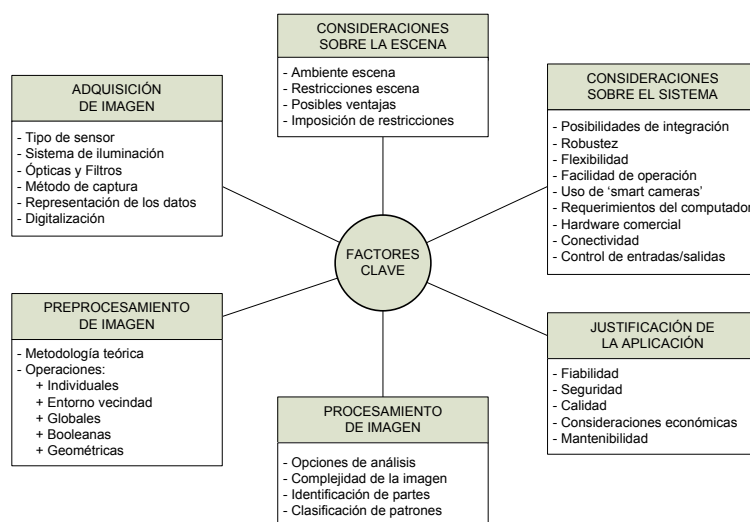


Figura 2.13: Factores clave en el diseño.

Algunos de ellos usan cámaras analógicas cuya señal de video analógica es digitalizada con una tarjeta capturadora o *frame grabber*. Otros, usan cámaras digitales que envían los datos directamente a la memoria del computador principal (GigE Vision) o a través de tarjetas de interfaz o procesadoras que implementan algún tipo de protocolo (Camera Link, Camera Link HS, GenICam, etc.). En algunas aplicaciones especiales se usan pequeñas cámaras inteligentes o *smart cameras* integrando en una misma *caja* un sistema completo de visión compacto.

2.5.2 Factores clave en el diseño de sistemas de visión industriales.

La optimización del diseño de cualquier aplicación de visión industrial por computador ha de estar completamente justificada y tener en cuenta una serie de factores claves en el diseño[172]. En general, estos factores se pueden clasificar en seis categorías distintas (figura 2.13):

1. *Consideraciones sobre la escena.* Análisis del ambiente dónde se encuentra la escena que va a ser adquirida por el sistema de visión teniendo en cuenta las restricciones derivadas de la propia ubicación (características del entorno, del proceso de producción, objetos, materiales, etc.) y ventajas que se podrían aprovechar. Tener en cuenta, también, aquellas restricciones de carácter particular que deseamos imponer en el diseño.
2. *Adquisición de la imagen.* Es uno de los más importantes y con mayor implicación en el rendimiento de los sistemas de visión debido a que la adquisición de una imagen de alta calidad facilitará el procesamiento y análisis posterior de la imagen. Tanto el hardware como el software están involucrados en este proceso de tal manera que la adecuada elección de los mismos será crucial para alcanzar el objetivo.

Para la adquisición de la imagen se tendrán en cuenta el tipo de sensor (CCD, CMOS, etc.), el sistema de iluminación a emplear, si se requiere el uso de ópticas o filtros especiales, el método de captura (una cámara, visión estéreo, múltiples cámaras, etc.), la representación de los datos (2D,3D) y la digitalización (si se va a realizar en la propia cámara o requiere de tarjetas capturadoras, de interfaz o procesadoras).

3. *Preprocesamiento de la imagen*. Procesamiento previo de la imagen mediante la aplicación de funciones y transformaciones que facilitan la extracción de información para el procesamiento y análisis posterior. Estará integrado por las siguientes operaciones [173]:
 - a) Individuales. Consisten en la aplicación de una función que altera píxel a píxel los datos en una escala global (operador identidad, inverso o negativo, umbralización, operador de extensión, reducción del nivel de gris y transformaciones de dos imágenes punto a punto: adición, sustracción y rodajas del plano de bits).
 - b) En el entorno de vecindad. Operaciones que actúan sobre el valor del nivel de gris de un píxel considerando el valor de los píxeles que le rodean (filtrado y suavizado de la imagen).
 - c) Globales. Actúan sobre la distribución de los valores del nivel de gris o color dentro de la imagen. Algunas de estas técnicas, denominadas técnicas de realzado, se orientan hacia la mejora de la calidad de la imagen eliminando efectos no deseados tales como sombras y reflejos a la vez que aumentan el contraste de la imagen. Dentro de estas técnicas se encuentran el ajuste de brillo, contraste, corrección gamma, contracción, expansión, desplazamiento e igualación del histograma, realzado adaptativo del contraste, realzado y filtrado en el dominio de la frecuencia (transformada de Fourier, transformada del coseno, transformada Walsh-Hadamard, transformada wavelet, filtrado homomórfico, etc.) y combinaciones de técnicas.
 - d) Basadas en el álgebra de Boole. Aplicación de operaciones booleanas (AND, OR, NOT y XOR entre otras) sobre una imagen o varias imágenes binarias.
 - e) Geométricas. Transformaciones que modifican las coordenadas geométricas de los píxeles sin alterar el valor del nivel de gris (área de interés, interpolación, desplazamiento, escalado o cambio de escala, ampliación o zoom, reducción y giros). Posibles ajustes a realizar sobre la imagen: brillo, contraste, tablas de consulta (LUT), expansión y ecualización de histogramas, suavizado para la reducción del ruido (operaciones en el entorno), tamaño de la imagen, etc.
4. *Procesamiento de la imagen*. Evaluación de las posibles opciones para analizar la imagen, determinar la complejidad de la imagen, las características a extraer, qué parte o partes hay que identificar y qué patrones clasificar. Para ello y, según el caso, se utilizarán técnicas de detección de bordes y regiones, descriptores de líneas, contornos y regiones, operaciones morfológicas, reconocimiento de patrones mediante estimación, agrupación, redes neuronales, métodos estructurales y basados en la apariencia, clasificación de patrones y obtención de la forma a partir de la intensidad, la visión estereoscópica, la textura, el enfoque, etc. [173].

5. *Justificación del sistema de visión.* Determinar si se mejora la seguridad y fiabilidad o si hay mejora en la calidad del proceso de producción según lo que se pretenda conseguir del sistema de visión. Tener siempre en cuenta si es viable o está justificado económicamente y se puede amortizar (valor añadido que aporta). Consideraciones relativas al mantenimiento del sistema (si es sencillo o complejo y lo que representa desde el punto de vista económico).
6. *Consideraciones sistemáticas.* Posibilidad de integración del sistema en la infraestructura de la empresa, grado de flexibilidad para adaptarse a cambios en la producción, robustez, facilidad de operación, si se va a requerir cierta inteligencia en la cámara (smart system), especificaciones del PC de adquisición y procesamiento, conectividad del sistema, uso de hardware comercial, control de entradas y salidas de señales de sensores y actuadores.

CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN

En la práctica, el éxito de una determinada tarea de visión requiere ejecutar una secuencia de actividades o pasos relacionadas con el diseño del sistema de visión industrial. La CTMV¹ define estos pasos como la *secuencia óptima* para el diseño de un sistema y está compuesta de las siguientes actividades [109]:

- *Especificación de la tarea.* El éxito en el diseño se basa en una especificación detallada del sistema. Ésto requiere describir la tarea y el ambiente o entorno en el que se va a desarrollar.
- *Diseño del sistema.* Llevará aparejado una serie de actividades que conducen a la selección de elementos (cámara, lente, tarjeta capturadora, plataforma hardware, iluminación, interfaces eléctricos y mecánicos y software).
- *Cálculo de costes.* Tendrán que evaluarse tanto a nivel de hardware como de software sin olvidar los costes relacionados con la instalación y puesta en marcha del sistema.
- *Desarrollo, instalación y puesta en marcha del sistema.* Una vez finalizadas las actividades anteriores se procede a la ejecución propiamente dicha del proyecto.

3.1 ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA.

La primera etapa tiene por objeto definir y establecer las especificaciones del sistema de visión en lo que al diseño respecta. Estas especificaciones no tienen porque ser fijas sino que pueden cambiar o incluso se pueden añadir nuevas especificaciones durante la realización del proyecto.

3.1.1 La tarea de visión y sus beneficios.

La definición de la tarea y el beneficio a obtener son los dos parámetros más importantes a definir en las especificaciones. Así, cuestiones como la precisión esperada, el tipo de tarea de visión o combinación de ellas (tabla 3.1a), tipo de evaluación o combinación (tabla 3.1b), metas perseguidas (tabla 3.1c), medidas que han de realizarse, etc., deben quedar claramente definidas.

Por otro lado, las ventajas y beneficios de un sistema de visión automatizado pueden ser múltiples pero deben contrastarse con el coste total del sistema para evaluar su viabilidad desde el punto de vista económico.

¹ Consulting Team Machine Vision. Consultora con gran experiencia en el diseño de sistemas de visión automatizados (<http://www.ctmv.de>).

TIPOS DE TAREA
Reconocimiento de código
Reconocimiento de objeto
Reconocimiento de posición
Chequeo de producto completado
Chequeo de forma y dimensión
Inspección superficial

(a) Tareas de visión.

TIPOS DE EVALUACIÓN	DESCRIPCIÓN
Inspección	Chequeo posterior al proceso de producción
Monitorización	Observación durante el proceso de producción

(b) Evaluación.

METAS PERSEGUIDAS	DESCRIPCIÓN
Reconocimiento	Caracterización del objeto o proceso de producción
Control	Cambio o control del proceso de producción

(c) Meta.

Tabla 3.1: Tareas, evaluaciones y metas.

3.1.2 Tipo de sistema.

Los sistemas de visión también pueden ser categorizados de varias formas basándose en distintos criterios que permiten diferenciarlos entre sí:

- *Dimensionalidad*: 0, 1, 2 y 3D².
- *Flexibilidad*: desde los más simples y limitada capacidad de configuración hasta los más complejos y programables.
- *Base del sistema*: PC's, cámaras inteligentes (intelligent or smart cameras) basadas en DSP's, circuitos integrados y algoritmos adaptados y grandes computadores paralelos.
- *Grado de desarrollo*: nivel de desarrollo a emplear en la fabricación del sistema. Si la fabricación del sistema integra componentes comerciales (COTS³) o requiere su desarrollo.

² La dimensión '0' equivale a un punto o *spot*.

³ Commercial Off-The-Shelf.

Según el grado de complejidad, los tipos de sistemas de visión más comunes son los siguientes:

- *Sensores.* Pequeños sistemas cableados de propósito simple que procesan hasta una dimensión y cuya salida suele ser binaria.
- *Sensores de visión.* Sistemas contruidos para un único propósito que generan una salida simple (binaria, numérica o cadena de caracteres). Un ejemplo de este tipo de sistemas son los lectores de matriz de datos.
- *Sistemas compactos.* Sistemas que integran en un único dispositivo la adquisición y procesamiento de imagen. En algunos casos integran también la iluminación. Según las prestaciones y capacidades tienen una denominación diferente en el mercado (intelligent camera, smart camera, smart sensor, etc.).
- *Controladores de visión.* Son pequeñas unidades multi-proceso configurables. En esencia, pequeños computadores especializados en tareas de visión industrial equipados con interfaces de comunicación para propósitos de automatización.
- *Sistemas basados en PC.* Son los sistemas más comunes y empleados. Están compuestos de un procesador de propósito general integrado en una placa base, memoria, disco duro, diversos buses, tarjetas de interfaz y capturadoras todos ellos funcionando bajo un sistema operativo estándar (Windows, Linux, etc.). Se pueden distinguir tres tipos de sistemas: basados en librerías de visión artificial (SDK's), interfaces gráficas de usuario (GUI's) y aplicaciones específicas.

3.1.3 Descripción del objeto a inspeccionar.

El diseño preliminar va a requerir una descripción precisa del objeto. Un aspecto importante, que puede ayudar a la descripción de éste, es recavar una serie de muestras para la realización de un estudio y análisis pormenorizado de sus características. La descripción del objeto deberá tener en cuenta los siguientes elementos:

- *Tipo de producción:* Procesamiento por lotes (por ejemplo, inspección de tornillos que se mueven sobre una cinta transportadora) o continuo (procesamiento de una banda de acero en una línea de acabado).
- *Dimensiones* máximas y mínimas.
- Posibilidad de cambio en la *forma del objeto*.
- *Características* que han de ser extraídas.
- *Descripción* de las características del objeto en lo que a *errores* concierne (¿qué es lo que se considera error?).
- *Rango de variaciones* en las características comunes de los objetos.
- *Material y Acabado superficial.*
- *Color.*
- Corrosión, películas de aceite, agua, adhesivos, etc.

- Cambios en el objeto debidos al *etiquetado* y *marcaje*.
- Posible *interacción del sistema de visión* con el objeto (por ejemplo, sensibilidad del objeto inspeccionado a cierto rango de la luz, temperatura, etc.).

3.1.4 *Presentación.*

La presentación se refiere a cómo se coloca el objeto a inspeccionar ante el sistema de visión. Los factores a tener en cuenta son los siguientes:

- *Movimiento del objeto.* Especificar si el objeto pasa ante el sistema de visión de forma continua o se detiene durante un instante para ser inspeccionado.
- *Tolerancias.* Estimar las variaciones máximas permitidas (traslaciones y rotaciones) durante el posicionamiento del objeto ante el sistema de visión. La suma de estas tolerancias afectarán al campo de visión y a la profundidad de campo.
- *Número de objetos en la imagen.* En el caso de que la imagen a procesar muestre más de un objeto se requerirá especificar el número total de objetos, si se solapan y si se encuentran en contacto.

3.1.5 *Requerimientos de funcionamiento.*

Se especificarán la precisión y el tiempo de ejecución de la tarea de visión. Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes factores:

- *Tiempo total de ciclo* de la tarea.
- *Comienzo* de la adquisición.
- *Tiempo de procesamiento* máximo.
- *Respuesta del sistema.* Si se requiere una respuesta inmediata de la tarea de visión o no (por ejemplo, si un objeto rechazado tras su inspección requiere una respuesta rápida que active un actuador que lo expulse de la cadena de producción).

3.1.6 *Interfaces de información.*

El sistema de visión dispone de una serie de interfaces que le permitirán estar integrado en la factoría para el intercambio de información. Los interfaces son usados comúnmente para realizar una serie de funciones básicas:

- Interfaz de usuario para el manejo y visualización de resultados.
- Trazabilidad. Identificación del objeto inspeccionado.
- Comienzo de la inspección.
- Almacenamiento de resultados en ficheros de registro y bases de datos.
- Establecimiento de protocolos de comunicación con PLC's, RTU's, etc.
- Mantenimiento remoto.

Los *tipos de datos* que van a ser intercambiados son:

- Señales de control.
- Resultados.
- Parámetros de configuración.
- Datos en masa (típicamente imágenes).

Y los *canales o formas de transporte de datos*:

- Señales digitales E/S.
- Buses de campo (Profibus, Can-bus, Interbus-S, etc.).
- Interfaces serie (RS-232, RS-422, RS-485, USB, etc.).
- Redes (ethernet: TCP/IP, HTTP, FTP, etc.).
- Ficheros (de imágenes, de estadísticas, etc.).

3.1.7 *Espacio.*

La instalación del sistema de inspección tendrá unas necesidades de espacio que hay que evaluar previamente. Contemplan los siguientes factores:

- Volumen disponible para la instalación.
- Espacio de cerramientos para elementos de visión e iluminación.
- Distancia al objeto a inspeccionar d_{obj} .
- Espacio para mantenimiento (ajustes y calibración).
- Volumen requerido por elementos adicionales (actuadores, sensores, cableado, accesos, etc.).

3.1.8 *Consideraciones del entorno.*

Los aspectos más importantes a tener en cuenta sobre el entorno de operación del sistema de visión son los siguientes:

- Luz ambiental.
- Suciedad o polvo.
- Ambiente corrosivo.
- Vibraciones o impactos.
- Temperatura de operación.
- Clase de protección requerida (agua, polvo, fuego, eléctrica, etc.).
- Disponibilidad de suministro (alimentación eléctrica, aire comprimido, agua, etc.).

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA.

Toda la información plasmada en la especificación de la tarea va a servir de base para acometer la siguiente etapa: el diseño del sistema. El desarrollo de este punto proporciona una guía para el diseño de un proyecto genérico de visión.

3.2.1 Tipo de cámara.

La elección del tipo de cámara es fundamental para el diseño del sistema de visión ya que influencia directamente el hardware y el proceso de adquisición de la imagen.

La *arquitectura interna del sensor* es el parámetro básico que determina el tipo de cámara del sistema de visión. Internamente, el sensor de una cámara está formado por una serie de pequeños sensores individuales denominados *photo sites* que convierten los fotones procedentes del mundo real en una señal eléctrica. Esta conversión dependerá de cuánta luz incide sobre el sensor (intensidad), del tiempo que el sensor se encuentra acumulando carga (tiempo de exposición) y de la eficiencia en la conversión de los fotones en carga (respuesta espectral).

En función de la distribución espacial de los *photo sites* se tendrá una arquitectura en una dimensión (cámaras lineales, figura 3.1a) o en dos dimensiones (cámaras matriciales o de área, figura 3.1b).

Las denominadas *cámaras de área o matriciales* son las más comunes en automatización y proporcionan una serie de ventajas respecto a las cámaras lineales sobre todo en lo que respecta al ajuste de la cámara que suele ser, por lo general, más sencillo que el de una cámara lineal ya que no requiere movimiento relativo alguno entre el objeto y la cámara.

Las *cámaras lineales* suelen usarse en aplicaciones donde el objeto o la cámara se encuentran en un movimiento cuya dirección es perpendicular a la dirección del sensor lineal. La aplicación más típica de este tipo de cámaras suele ser la inspección de superficies continuas en movimiento.

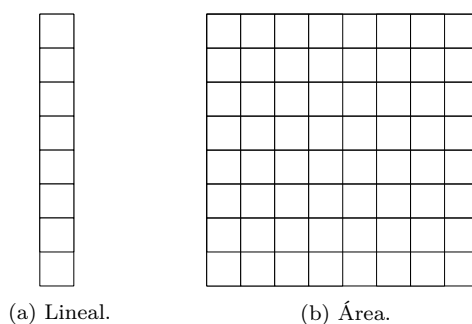


Figura 3.1: Tipo de cámara según distribución espacial.

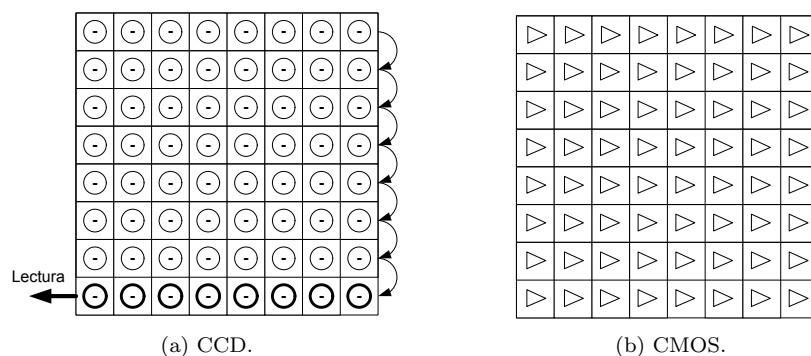


Figura 3.2: Tecnologías.

En las cámaras lineales convencionales la velocidad de adquisición de línea va a limitar el tiempo de exposición del sensor haciendo prácticamente imposible aplicaciones de alta velocidad y baja iluminación. Las *cámaras lineales TDI* (*Time Delay Integration*) solucionan este inconveniente adquiriendo instantáneamente varias líneas y sumando sus efectos. Ésto provoca un aumento de la sensibilidad de la cámara y, por tanto, la posibilidad de que la cámara pueda trabajar en aplicaciones donde antes estaba limitada.

La *tecnología del sensor* de estado sólido también es un factor importante. Los dos tipos fundamentales de tecnología sobre la que están contruídos los sensores son la de estado sólido CCD (*Charge Coupled Device*) y la CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

En el sensor CCD (figura 3.2a) la lectura de los valores de los *photo sites* que componen el sensor se realiza individualmente por filas trasladándose las cargas a la fila inmediatamente inferior en cada lectura. Una vez que una fila ha alcanzado el final es leída. De esta manera, se hace un barrido secuencial de los valores de cada una de las filas hasta completar el total de filas del sensor.

Existen distintos tipos de cámaras CCD entre las que cabe destacar las siguientes:

- *Cámara entrelazada.* La imagen de un objeto se adquiere y muestra como la composición de dos imágenes, una de ellas formadas por las líneas pares del sensor y otra por las líneas impares. La tecnología entrelazada de este tipo de cámaras se divide, a su vez, en otros dos tipos: cámaras entrelazadas con integración de campo (baja resolución vertical y buena temporal) y cámaras entrelazadas con integración de marco o *frame* (buena resolución vertical y baja temporal).
- *Cámara progresiva.* La imagen es escaneada línea a línea por lo que pueden tomarse imágenes de forma instantánea. Este tipo de cámaras tienen una buena resolución vertical y temporal.

En el caso del sensor CMOS (figura 3.2b) la lectura se realiza multiplexando individualmente el valor de cada *photo site* sin tener que realizar transferencia alguna de carga como se produce en el sensor CCD. Cada *photo site* dispone de una circuitería amplificadora por lo que pueden ser accedidos de manera aleatoria. La tabla 3.2 muestra una comparativa general de ambas tecnologías.

CARACTERÍSTICA	CCD	CMOS
Relación Señal/Ruido	Muy Alta	Baja
Calidad de imagen	Buena	Buena
Lectura	Lenta	Rápida
Sensibilidad	Muy Alta	Baja
Consumo	Alto	Bajo
Timing de señales	Complejo	Sencillo
Procesamiento Integrado	Complejo	Sencillo
Uniformidad Espacial	Muy Buena	Media
Obturador electrónico	Sin problema	Prob. movimiento
Creación área de interés	No	Si
Coste	Alto	Bajo

Tabla 3.2: Comparativa tecnología CCD y CMOS.

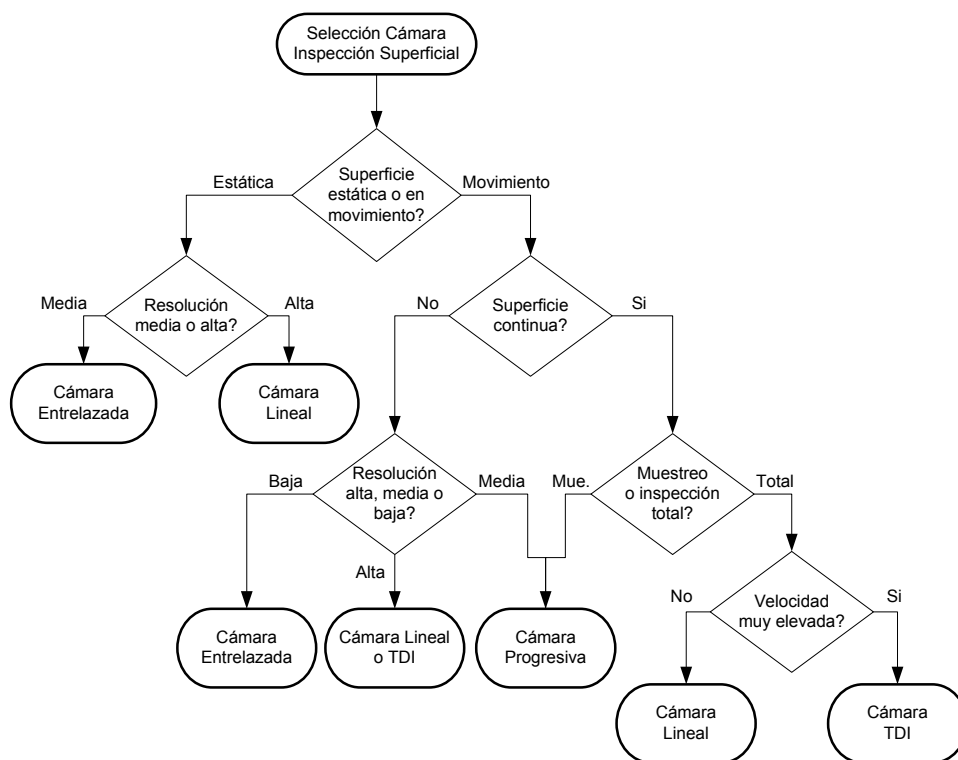


Figura 3.3: Selección de la cámara en aplicaciones de inspección superficial.

La figura 3.3 muestra un diagrama de flujo que puede servir de ayuda para la selección del tipo de cámara en función de las características de la superficie, el tipo de producción, la resolución necesaria y el modo de inspección [29].

3.2.2 Campo de visión.

El campo de visión viene determinado por los factores siguientes (figura 3.4):

1. *Tamaño máximo del objeto.*
2. *Tolerancia máxima en posicionamiento.* Tiene en cuenta los desplazamientos y rotaciones del objeto cuando es posicionado ante el sistema de visión.
3. *Márgenes.* Puede ser que, para evitar problemas o mejorar el rendimiento, el procesamiento de imagen requiera que se establezcan una serie de márgenes. Este es el caso de las errores geométricos producidos por la lente, tipo almohadilla o barril, donde las mayores distorsiones se producen en las zonas más externas de la imagen.
4. *Relación de aspecto.* Se tendrá en cuenta cuando el campo de visión obtenido no se adapte al formato del sensor de la cámara (la mayoría de las cámaras proporcionan una relación de aspecto horizontal/vertical de 4:3: $FOV_h = \frac{4}{3} \cdot FOV_v$).

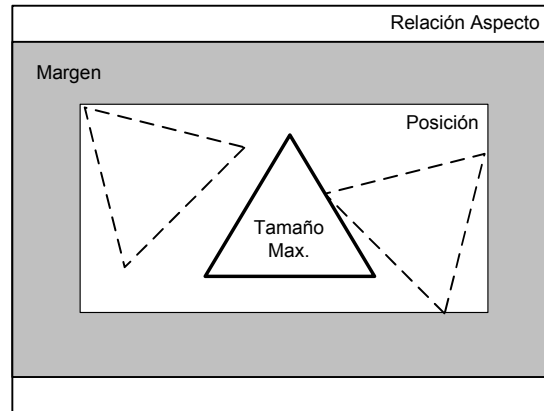


Figura 3.4: Campo de visión (FOV, Field Of View).

Así, teniendo en cuenta todos estos factores, el campo de visión FOV horizontal y vertical pueden expresarse según las ecuaciones siguientes:

$$FOV_h = S_{max} + T + M \quad (3.1)$$

$$FOV_v = \frac{FOV_h}{AR} \quad (3.2)$$

TIPO DE ALGORITMO	PRECISIÓN ESPERADA (Nf)
Detección de borde	1/3
Reconocimiento de regiones	3
Casamiento de patrones	1

Tabla 3.3: Precisión esperada en la medida.

donde S_{\max} es el tamaño máximo posible del objeto, T es la tolerancia en el posicionamiento, M es el margen considerado y AR es la relación de aspecto del sensor de la cámara considerado.

3.2.3 Resolución.

En lo que respecta al concepto de resolución, es necesario establecer una distinción:

- *Resolución del sensor de la cámara* (Rc_h , Rc_v). Número de filas Rc_h y columnas Rc_v que proporciona el sensor de la cámara expresado en píxeles. En el caso de cámaras lineales solamente se aplica una dimensión. Para el diseño posterior de la óptica se deberá tener en cuenta el tamaño individual del *photo site*.
- *Resolución espacial* (Rs_h , Rs_v). Es la correspondencia directa realizada por la óptica de la cámara desde el objeto en el *mundo real* hasta el plano imagen del sensor y que viene expresado en mm/píxel. En caso de que los *photo sites* no sean completamente cuadrados habrá que tener en cuenta que la resolución espacial horizontal va a ser distinta de la vertical ($Rs_h \neq Rs_v$).
- *Precisión de la medida* (Sf , Nf). Tamaño Sf , expresado en mm, de la característica más pequeña que puede ser medida por el sistema Sf teniendo en cuenta la calidad de la imagen obtenida y el algoritmo que se aplicará posteriormente durante el procesamiento de la imagen. La tabla 3.3 muestra una serie de algoritmos básicos y el número mínimo de píxeles Nf requeridos para detectar la característica usando el algoritmo considerado⁴.

Considerando una *cámara de área*, la evaluación de la resolución espacial necesaria puede calcularse según las ecuaciones siguientes:

$$Rs = \frac{FOV}{Rc} \quad (3.3)$$

$$Rs = \frac{Sf}{Nf} \quad (3.4)$$

⁴ Nf es la correspondencia directa de Sf desde el plano objeto hasta el plano imagen de la cámara.

En el caso de que FOV sea conocido, la resolución de la cámara puede expresarse combinando las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$R_c = \frac{FOV}{R_s} = FOV \cdot \frac{N_f}{S_f} \quad (3.5)$$

Si se considera una *cámara lineal*, la resolución según el eje del sensor puede calcularse igual como se ha hecho para la cámara de área. La resolución según la dirección de muestreo del objeto vendrá definida por el tiempo de muestreo t_s , en s/píxel, y dependerá de la velocidad relativa cámara-objeto v expresada en mm/s.

$$t_s = \frac{R_s}{v} \quad (3.6)$$

3.2.4 Selección de elementos hardware.

Una vez que son conocidos el tipo de cámara y la resolución requerida para la tarea de visión se dispone de información suficiente para la selección de varios elementos hardware: cámara, tarjeta capturadora, la tasa de pixel o pixel rate y la plataforma hardware.

Los parámetros más importantes a tener en cuenta para la *selección de la cámara* son los siguientes:

- Sensor color o monocromo.

El uso del color en aplicaciones de reconocimiento y verificación óptica de caracteres (OCR y OCV), lectura de códigos de barras, medición dimensional y otras aplicaciones dependientes de información espacial de alta resolución no ofrecen ventaja alguna frente a cámaras monocromáticas.

En general, se deberá tener en cuenta las ventajas de utilizar una cámara monocroma frente a una cámara de color: mayor sensibilidad, mejor contraste, mejor relación señal-ruido y menor coste. Por otro lado, los sensores de color suelen utilizarse para resolver tres clases de problemas [174]:

- Verificación del color. Si el color de un objeto o parte de éste coincide con un determinado color patrón.
 - Ordenación. Ordenar objetos según su color.
 - Inspección del color. Búsqueda de defectos en objetos o partes de éstos cuando no es posible hacerlo a partir de imágenes en escala de grises.
- Interfaces a necesarios (señales E/S digitales, CameraLink, ethernet, USB, etc.).
 - Cámara progresiva (caso de cámaras de área).
 - Tamaño.
 - Precio y disponibilidad.

En el caso de la *tarjeta capturadora* o *frame grabber*, los parámetros a tener en cuenta son:

- Ancho de banda necesario para la adquisición de imágenes.
- Compatibilidad con la librería software.
- Número de cámaras a direccionar.
- Utilidades de control de las cámaras a través de la tarjeta capturadora.
- Temporización (timing) y disparo (triggering) de la cámara.
- Disponibilidad de señales E/S de propósito general (disparo o strobe de la fuente de iluminación, señales de sensores, encoders, etc.).
- Disponibilidad de procesamiento en la propia tarjeta.
- Precio y disponibilidad.

Para la determinación del ancho de banda requerido por el proceso de adquisición de imágenes se requiere tener en cuenta dos variables: tasa de datos instantánea y promedio [175].

La *tasa de datos instantánea* (DR_i) es la variable más importante a considerar y se define como la velocidad, en megabytes por segundo (MB/s), a la que la cámara transfiere datos a la tarjeta capturadora o frame grabber y que depende de la frecuencia del *pixel clock* de la cámara. Una tasa de datos instantánea mayor que el ancho de banda máximo soportado por el frame grabber provoca que éste no sea capaz de transferir los datos lo suficientemente rápido a través del bus acumulándose los datos en el búffer de almacenamiento del frame grabber.

Dependiendo de la capacidad de este búffer y de la cantidad de datos a transferir podrá llegar un momento en el que el frame grabber se desborde provocando el fallo de la adquisición. La ecuación para el cálculo de la tasa de datos instantánea es la siguiente:

$$DR_i = C_{PC} \cdot N_{color} \cdot N_{taps} \quad (3.7)$$

donde C_{PC} es la frecuencia del pixel clock de la cámara o pixel clock rate (en MHz), N_{color} es la profundidad de color de la imagen (en bytes) y N_{taps} es el número de taps de la cámara (número de píxeles que es capaz de leer la cámara en cada pulso del pixel clock).

La *tasa de datos promedio* o *pixel rate* (PR) es la velocidad, expresada en bytes por segundo, a la que el software recibe una imagen completa de la cámara. El pixel rate de una cámara de área puede determinarse como:

$$PR = R_{ch} \cdot R_{cv} \cdot N_{color} \cdot fr \cdot (1 + \% \text{ carga adicional}) \quad (3.8)$$

donde R_{ch} y R_{cv} son las resoluciones horizontal y vertical de la cámara en píxeles y fr el número de imágenes por segundo (frame rate) que se adquieren.

TECNOLOGÍA DEL BUS	ANCHO DE BANDA MÁXIMO (MB/s)
PCI	96
PCI-Express x1	250
IEEE 1394	400
CameraLink	680
PCI-Express x16	4000

Tabla 3.4: Ancho de banda máximo según la tecnología del bus.

Para la carga adicional podría considerarse un valor entre el 10 % y un 20 % debido a la transferencia de la imagen desde la cámara al frame grabber.

El PR para una cámara lineal será:

$$PR = Rc \cdot N_{color} \cdot fs \cdot (1 + \% \text{ carga adicional}) \quad (3.9)$$

donde fs es la frecuencia en hercios para la adquisición de líneas (line frequency).

A modo orientativo, la tabla 3.4 muestra el ancho de banda máximo, en megabytes por segundo, que puede proporcionar una determinada tecnología de bus⁵.

Los factores más importantes a considerar para la *selección de la plataforma hardware de procesamiento* son los siguientes:

- Compatibilidad con la tarjeta capturadora.
- Sistema operativo.
- Proceso de desarrollo del software.
- Interfaz de usuario.
- Carga de proceso y velocidad de transferencia de píxeles (pixel rate). La plataforma hardware tendrá que ser capaz de manejar ambas.
- Otros. Memoria necesaria, disco duro, tamaño del chasis, interfaces, precio y disponibilidad.

⁵ Valores para PCI express versión PCIe 1.1 y IEEE 1394 versión S1600.

3.2.5 Selección de la óptica.

Una vez determinados el campo de visión FOV, la resolución del sistema R_s y de la cámara R_c y la distancia al objeto d_{obj} se puede proceder a la selección de la óptica de la cámara.

El primer parámetro a calcular será la distancia focal f . En la mayoría de los casos, suele escogerse el modelo de lente delgada para el cálculo de la distancia focal ya que se cumple la condición para ello: el espesor de la lente es muy pequeño en comparación con su radio. Se trata de un modelo sencillo que proporciona una estimación razonable del valor de este parámetro.

La distancia focal f está relacionada con la distancia de trabajo d_{obj} y con la magnificación primaria β según la ecuación siguiente:

$$f = d_{obj} \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (3.10)$$

Considerando que el campo de visión se corresponde de forma exacta al tamaño del sensor S_s , la magnificación primaria (relación entre el tamaño real del objeto y su tamaño en el plano de la imagen) puede evaluarse de la siguiente manera:

$$\beta = -\frac{S_s}{FOV} \quad (3.11)$$

Las lentes se encuentran disponibles en el mercado en una serie de distancias focales comunes (6 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm, 25 mm, 35 mm, 50 mm, etc.) por lo que su selección debe hacerse dentro de este rango.

Una vez seleccionada la distancia focal f de la lente habrá que rehacer los cálculos para obtener el nuevo valor de la distancia de trabajo d_{obj} . Despejándola de la ecuación 3.10 se obtiene:

$$d_{obj} = f \cdot \frac{1 - \beta}{\beta} \quad (3.12)$$

En el caso de que con una determinada lente se desee enfocar un objeto que se encuentra a una distancia menor que la distancia mínima de enfoque de la lente se requerirá el uso de *tubos o anillos de extensión*. Antes de usarlos se deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La óptica no enfoca en el infinito.
- Decrementa la intensidad de luz que alcanza el sensor.
- La profundidad de campo disminuye.
- La zona central del plano imagen aparece más iluminada que los bordes.

El *diámetro de la lente* y el *tamaño del sensor* de la cámara son dos factores que están relacionados entre sí. Respecto al tamaño del sensor, éste se encuentra estandarizado en una serie de dimensiones expresadas en pulgadas: 1/4", 1/3", 1/2", 2/3", 1", etc. Una de las variables para la selección de la lente es el formato de sensor para el cual está indicada. Aunque, cabe la posibilidad de hacer combinaciones de formatos lente-sensor distintos solamente aquellas combinaciones en las que el formato de la lente es mayor que el formato del sensor son adecuadas. Una combinación a la inversa originará aberraciones en la imagen y baja iluminación del sensor.

La *apertura relativa de la lente* o *número-F* (también suele venir definido como $(f/\#)$) se utiliza para expresar las características de transmisión de la lente, es decir, la cantidad de luz que deja pasar la lente desde el mundo real hasta el interior de la cámara. El número-F puede calcularse en función de la distancia focal f y del diámetro de la apertura del diafragma o iris de la lente \emptyset .

$$\text{número} - F = \frac{f}{\emptyset} \quad (3.13)$$

El iris ajustable del interior de la lente normalmente utiliza una nomenclatura especial con una serie de incrementos estándar: 1,0, 1,4, 2,0, 2,8, 4, 5,6, 8, 11, 16, 22, etc. Los números más bajos corresponderán con un diámetro del iris más abierto dejando pasar más cantidad de luz hacia el interior de la cámara y los números más altos con un diámetro más cerrado dejando pasar menos cantidad de luz.

Relacionado con el número-F, se encuentra un parámetro que define la distancia a la que el objeto va a aparecer enfocado: la *profundidad de campo* (DOF, Depth of Field). A menor diámetro de apertura del iris de la lente mayor será la profundidad de campo y viceversa. Este parámetro va a ser de gran importancia cuando puntos de la superficie del objeto se encuentran a distintas distancias de trabajo (geometría del objeto) y/o cuando varía la posición del objeto a lo largo del eje óptico durante su presentación ante el sistema de visión (movimientos de traslación y rotación).

Considerando una óptica ideal, la transmisión a través de ésta de las diferentes longitudes de onda λ que componen un haz luminoso es la misma. Mediante la adición de *filtros* a una óptica las relaciones de transmisión entre unas longitudes de onda y otras van a ser alteradas (ciertas longitudes de onda serán atenuadas frente a otras que no).

Fundamentalmente los *filtros* se utilizan para mejorar el contraste y la calidad de la imagen y mejorar el rendimiento de la lente. Hay una gran variedad de filtros en el mercado que se aplicarán en función del objetivo que se pretenda conseguir: infrarrojos, ultravioleta (usadas para proteger la lente y mejorar del contraste), de color (aumentan el contraste entre colores para facilitar su distinción), de densidad neutra (dan uniformidad a la luz y permiten variar el control de exposición de la luz), polarizadores (eliminación de brillos), etc.

La óptica ideal sería aquella capaz de reproducir exactamente el objeto que se está enfocando, incluyendo todos sus detalles y las variaciones de iluminación. En la práctica no ocurre así debido a que el comportamiento de la óptica es similar a la de un filtro paso-bajo atenuando las altas frecuencias.

El concepto de función de modulación de transferencia (MTF, *Modulated Transfer Function*) unifica resolución y contraste bajo un mismo parámetro y se define como la capacidad de un sistema para transferir contraste a un determinado nivel de resolución desde el objeto real a la imagen. Cada elemento individual (ópticas, filtros y sensor de la cámara) será un eslabón de la denominada *cadena de transmisión*. Así, para una frecuencia espacial de entrada r , cada uno de los elementos que componen el sistema tendrá un determinado MTF_i cuyo producto dará como resultado la función total de transferencia MTF_T (ecuación 3.14).

$$MTF_T(r) = \prod_{i=1}^n MTF_i(r) \quad (3.14)$$

La definición clásica del contraste⁶ o modulación transferida a la imagen, K , se expresa como:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.15)$$

I_{\max} Irradiancia máxima transferida al plano imagen.

I_{\min} Irradiancia mínima transferida al plano imagen.

En comparación con esta definición, el contraste de una imagen desde el punto de vista digital K_{dig} viene definido por la diferencia absoluta en el nivel de gris de una imagen, es decir:

$$K_{\text{dig}} = G_{\max} - G_{\min} \quad (3.16)$$

G_{\max} Nivel de gris máximo en la imagen.

G_{\min} Nivel de gris mínimo en la imagen.

Para entender el concepto de MTF de una manera sencilla se muestra una plantilla (figura 3.5) en la que se encuentran dibujadas barras del mismo tamaño de color blanco y negro dispuestas alternativamente. El contraste real entre las barras es, por tanto, del 100 %.

Considerando el número de pares de líneas por milímetro, lp/mm , vemos que cuando este valor es pequeño el contraste (diferencia entre intensidades) es del 100 %. Las líneas grandes separadas se transfieren a la imagen con un 100 % de contraste. Conforme aumenta este valor (frecuencia espacial) se observa que el contraste entre el blanco y el negro en la imagen va disminuyendo hasta llegar a valores próximos a cero.

⁶ El contraste desde el punto de vista de la percepción humana.

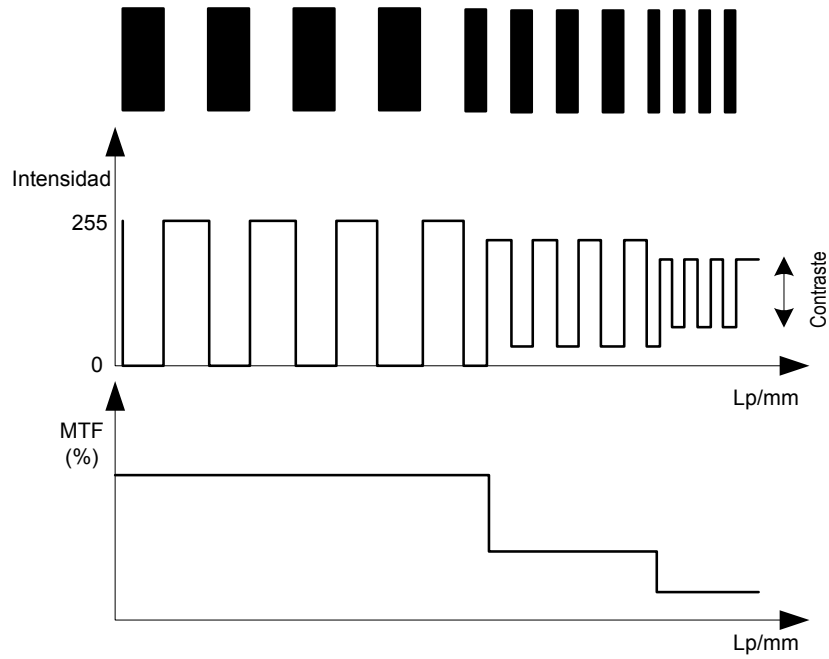


Figura 3.5: Función de modulación de transferencia (MTF)

Una adecuada selección del *poder resolutivo de la lente* R_L (expresado en lp/mm) asegurará la capacidad de la óptica para resolver cada uno de los píxeles del sensor de la cámara. El valor de R_L se fija por la resolución espacial a la frecuencia de Nyquist R_{Nyq} obtenida a partir de la distancia en milímetros entre píxeles o *photo sites* d_{px} del sensor de la cámara (ecuación 3.17 [109]).

$$R_{Nyq} = \frac{1}{2 \cdot d_{px}} \quad (3.17)$$

El poder resolutivo de la lente deberá cumplir $R_L \approx R_{Nyq}$ ya que de por encima de R_{Nyq} la imagen es falsificada por la adición de ruido y no tiene sentido elegir una óptica de mayor resolución.

Otros factores a tener en cuenta en la selección de la óptica son los fenómenos de difracción y las aberraciones ya que reducen el contraste de la imagen [176, 177].

La *distorsión* es un error óptico (aberración) que deforma geoméricamente la imagen sin que se vea afectada su nitidez, es decir, mantiene todos los puntos enfocados [178]. Se trata de un error que se produce durante la fabricación de la lente donde no es posible alcanzar espesores uniformes ni superficies completamente planas dando lugar a diferencias de magnificación entre diferentes puntos de la lente que se hacen máximas en los bordes.

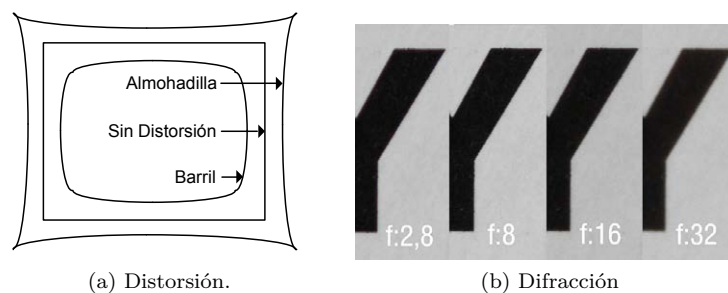


Figura 3.6: Distorsiones y difracciones.

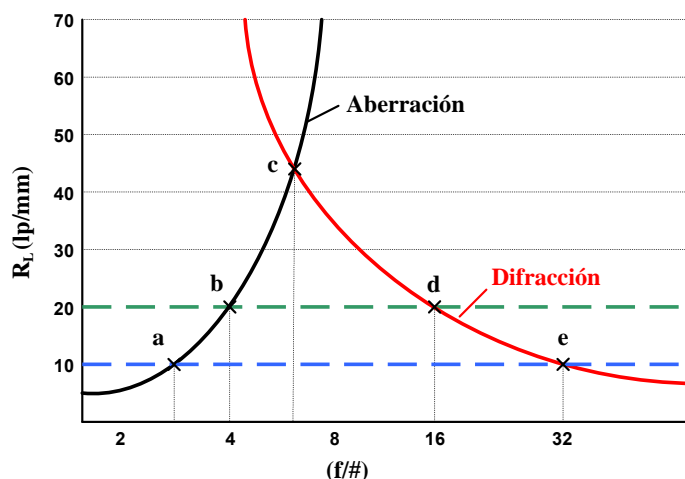


Figura 3.7: Curvas de difracción y aberraciones.

El efecto de la distorsión provoca que puntos del objeto queden desplazados en el plano de la imagen respecto al centro de la propia imagen. La deformación geométrica que se obtiene puede ser de tipo almohadilla o barril (figura 3.6a). En general, la distorsión tipo barril se produce con distancias focales pequeñas mientras que la tipo almohadilla con distancias grandes.

El fenómeno de la *difracción* aparece cuando la luz se dispersa al atravesar un pequeño orificio. Así, en el caso de la lente, conforme la apertura es más pequeña los rayos se dispersan en mayor grado originando una pérdida de nitidez en la imagen formada en el plano de la cámara (figura 3.6b).

El fabricante facilita la selección de la óptica suministrando una serie de gráficos. Uno de los más interesantes es el que representa el poder resolutivo de la lente R_L frente a la apertura ($f/\#$) mostrando las curvas límite de la *aberración* y *difracción* (figura 3.7).

Basado en este gráfico de ejemplo, si se requiere una resolución del sistema de $R_s = 20$ lp/mm el rango de aperturas útil es $[4, 16]$ (puntos *b* y *d*). En el caso de que se desee maximizar la profundidad de campo para una $R_s = 20$ lp/mm se fijaría el valor más elevado de la apertura ($(f/\#) = 16$).

3.2.6 Elección de la iluminación.

En visión por computador todo depende de la adquisición de la imagen y ésta, a su vez, de la iluminación [21]. El éxito o fracaso de un sistema de visión va a depender del acierto en la elección del sistema de iluminación lo que lo convierte en la parte más crítica dentro de un sistema de visión.

El propósito de la iluminación consiste en controlar la forma en la que la cámara ve el objeto por lo que debe ajustarse al objeto o superficie que se va a iluminar. El objetivo final de un sistema de iluminación, como parte integrante de un sistema de visión, se entenderá como la consecución de tres objetivos individuales [109]:

- *Maximizar el contraste de las características de interés.*

La iluminación va a determinar la calidad de las características que se van a extraer de la imagen por lo que necesitarán ser presentadas con el máximo contraste. Para alcanzarlo, se necesita una coordinación adecuada entre el sistema de iluminación y el sensor de la cámara. No hay una regla general que indique cuál es el contraste que necesita una aplicación ya que dependerá de la tarea de visión concreta y de los algoritmos de procesamiento desarrollados.

- *Minimizar el contraste del resto de características.*
- *Minimizar influencias externas.* Cumplir los objetivos anteriores frente a variaciones en algunas variables (tamaño, posición, orientación, variables ambientales, etc). En definitiva, alcanzar un *sistema robusto*.

La variación del contraste va a estar influenciada por los siguientes factores [109]:

- *La dirección de la luz.* Puede ser directa (procedente de un rango de ángulos limitado) o difusa (procedente de cualquier dirección).
- *Espectro de la luz.* La composición de las distintas longitudes de onda que forma el haz afectarán en gran medida al contraste. El uso de un rango específico del espectro (luz visible, ultravioleta, infrarrojos, etc.), considerar ciertos efectos (fluorescencia) o la utilización de filtros son determinantes.
- *Polarización.* El efecto de la polarización incrementa el contraste entre áreas del objeto que reflejan directamente la luz frente a la reflexión difusa (los efectos de la polarización se muestran de manera clara en superficies como el metal y el cristal).

La determinación de la configuración más óptima del sistema de iluminación es el resultado de experimentos basados en aproximaciones teóricas. En el diseño del sistema de iluminación de un SIVA se deberán tener en cuenta dos ideas [29]:

- *Conocer en profundidad la escena de inspección.* Para ello, se requerirá un análisis pormenorizado de las restricciones y especificaciones que vendrán impuestos por las características y condiciones de la adquisición de imágenes, las características y propiedades de los elementos que componen la escena y su comportamiento cuando son iluminados por una fuente luminosa ante diversas ubicaciones y configuraciones. Algunos de los aspectos a tener en cuenta son los siguientes [179]:

- Objeto a inspeccionar en movimiento o estático.
 - Velocidad del proceso de adquisición.
 - Material (metálico, no metálico, opaco, transparente, cerámico, cristal, plástico, etc.)
 - Textura de la superficie (rugosa, pulida, porosa, fibrosa, cepillado paralelo y circular, estriada, etc.)
 - Geometría de la superficie (plana, curva, prismática, esférica, cilíndrica, etc.).
 - Topografía de los elementos de la escena.
 - Color (transparente, semitransparente, blanco, rojo, negro, etc.).
 - Distancia de trabajo y área a iluminar.
 - Longitud de onda e intensidad de la fuente luminosa. Aplicación de filtros.
 - Características y distancia de trabajo del conjunto cámara-óptica.
 - Interacción de la luz ambiental.
 - Condiciones de seguridad.
 - Coste y tiempo de vida del sistema de iluminación.
- *Poner énfasis en conseguir un sistema de iluminación lo más óptimo posible.* Cualquier esfuerzo orientado a alcanzar una iluminación óptima incrementará el rendimiento y fiabilidad del sistema de visión.

Aunque se pueden diseñar algoritmos lo suficientemente robustos como para compensar una iluminación defectuosa, en general, no está justificado el coste que conlleva a nivel computacional y/o económico. Una iluminación correcta permitirá eliminar, o cuando menos reducir, el número de algoritmos de preprocesamiento necesarios para la adecuación de la imagen y, por tanto, aumentar la velocidad de proceso del sistema de visión. Siempre será más rápido solucionar el problema cambiando el sistema de iluminación que complicando el algoritmo [178].

Para poder alcanzar estos objetivos es necesario tener un conocimiento básico de los distintos tipos de fuentes de iluminación, técnicas de iluminación, reflectividad de superficies y aspectos fundamentales de cámaras y ópticas.

Considerando que el objeto a inspeccionar se encuentra ubicado en el centro de un círculo (figura 3.8), existen varios tipos de *configuraciones del sistema de iluminación* definidas según el posicionamiento relativo entre la cámara y el sistema de iluminación [109]:

- *Zona de iluminación incidente:*
 - Campo claro.
 - Campo claro parcial.
 - Campo oscuro.
- *Zona de iluminación a contraluz:*
 - Campo claro.
 - Campo oscuro.

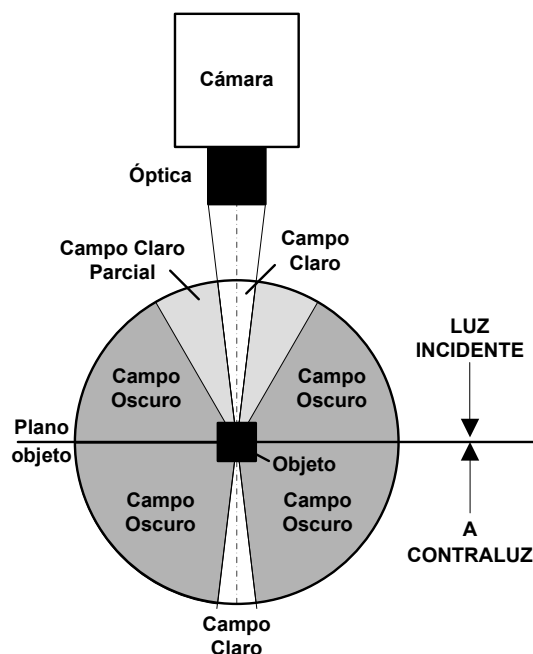


Figura 3.8: Configuraciones del sistema de iluminación.

LUZ INCIDENTE		A CONTRALUZ	
CAMPO CLARO	CAMPO OSCURO	CAMPO CLARO	CAMPO OSCURO
Difusa	Difusa	Difusa	Difusa
Direccional	Direccional	Direccional	Direccional
Telecéntrica	-	Telecéntrica	-
Estructurada	-	-	-

Tabla 3.5: Técnicas aplicables según configuración del sistema de iluminación.

La tabla 3.5 muestra la técnica de iluminación que se puede aplicar (difusa, directa, telecéntrica y estructurada) según las configuraciones del sistema de iluminación [109].

En las secciones C.1 y C.1.8 del apéndice C se desarrollan estas técnicas y se muestra un resumen que ayuda a seleccionar la técnica más apropiada. En este mismo apéndice, se aporta un resumen de las *fuentes lumínicas* más comunes (C.2).

La configuración y la fuente de luz más apropiada para la tarea de visión debe estar basada en la experimentación de las muestras con la cámara y las distintas técnicas y fuentes de iluminación teniendo por objetivo encontrar la combinación que maximiza el contraste.

Un aspecto final a tener en cuenta son las posibles *interferencias luminosas* que pueden producirse cuando se requiere el uso de varias configuraciones.

La soluciones son varias:

- *Separación espacial.*
 - Alejamiento suficiente entre configuraciones.
 - Crear estaciones individuales mediante cerramientos.
- *Separación temporal.* Secuenciar , si es posible, la adquisición de imágenes de cada cámara.
- *Uso del color.* El uso de fuentes de luz de diferentes colores y filtros especiales de color pueden hacer viable la adquisición de imágenes de cada cámara.

3.2.7 *Diseño mecánico y mecánico.*

Una vez determinados la cámara, la óptica y la configuración y técnica de iluminación más adecuada se procede al diseño mecánico del sistema teniendo en cuenta una serie de aspectos:

- *Espacio requerido para el ajuste* de la cámara y el sistema de iluminación. Los grados de libertad de cada elemento han de poderse ajustar de forma individual.
- Diseño de *elementos estructurales* para la fijación de los elementos del sistema de visión.
- *Ensamble y desensamble* de los elementos del sistema.
- *Condiciones ambientales y restricciones* que pueden derivarse de éstas.
- Considerar si la cámara requiere una *adaptación de su distancia de inspección* para realizar el enfoque correcto del objeto.
- Considerar la necesidad de *otros movimientos del sistema* y sus actuadores (por ejemplo, el movimiento requerido por una cámara lineal para el escaneo del objeto, puesta y salida de operación del sistema, etc.).
- *Protección* de los distintos elementos que conforman el sistema (cámara, iluminación, sensores, etc.).
- Acceso al sistema en operaciones de *mantenimiento*.
- Espacio requerido y ubicación de *otros elementos* del sistema (armarios, cajas de derivación, PC, etc.).
- Trazado y dimensiones de *canalizaciones* (cableado, suministro de aire comprimido, etc.).

A continuación se realiza el diseño eléctrico para lo cual se tendrán en cuenta los siguientes factores:

- *Suministro eléctrico.* Considerar los niveles de tensión y consumo de los distintos elementos que componen el sistema, así como, la necesidad de que sean provenientes de un SAI (sistema de alimentación ininterrumpida).
- Características del *cableado* (longitud, secciones, apantallamiento, resistencia a tracción y torsión, etc.) y posibles movimientos entre elementos del sistema (cadenas portacables, radio mínimo de flexión, etc.)

- *Integración* con sistemas y elementos internos (elementos propios del sistema de visión) y externos (PLC's, RTU's, sensores, actuadores, encoders, bases de datos, computadores, etc.).
- *Interconexión* de elementos y cableado.
- Amplificadores, repetidores y convertidores de señal.
- Diseño de *cuadros eléctricos y protecciones eléctricas*.
- *Puestas a tierra y masa*.
- *Compatibilidad electromagnética e interferencias*.

3.2.8 Software.

Los aspectos fundamentales a considerar para el software son los siguientes:

- Utilización de *librerías de visión*:
 - *Funcionalidad* de la librería. Conocer si las funciones de la librería se adaptan a los algoritmos de procesamiento previstos para el sistema de visión.
 - *Compatibilidad* con el hardware del sistema de visión y con el sistema operativo.
- *Nivel de desarrollo* a emplear en el procesamiento. Si se requiere una programación intensiva del software o sólo se necesita una configuración básica de parámetros para adaptarse a la tarea de visión.
- *Complejidad de la estructura del software*. Puede ser *simple*, en tareas de visión donde se aplican pocos algoritmos, o *compleja*, en aquellas que integran el uso de varias cámaras, movimientos relativos de elementos, sincronizaciones de señales, control de la iluminación, computación y arquitectura hardware paralela, etc.
- *Uso, configuración y mantenimiento*. Funcionalidades adicionales a considerar para la explotación del software:
 - *Visualización de imágenes en vivo* de las cámaras.
 - *Visualización en detalle del procesamiento de la imagen*.
 - Posibilidad de *almacenamiento* de imágenes.
 - *Modo de mantenimiento* (ajustes y calibraciones en cámara e iluminación). Posibilidad de mantenimiento remoto (VPN, módem, etc.).
 - Ficheros de *registro de eventos* (información del estado, warnings y errores generados por el sistema).
 - *Ajuste y configuración* de parámetros.

3.3 COSTES.

Una vez finalizado el diseño del sistema y antes de proceder a la ejecución del proyecto han de evaluarse los costes. En general, los costes pueden ser divididos entre costes iniciales de desarrollo y costes operativos.

Los *costes de desarrollo* van a considerar las siguientes partidas:

- Gestión del proyecto.
- Diseño base (*).
- Componentes del hardware.
- Licencias del software.
- Desarrollo del software (*).
- Instalación.
- Test para la puesta en marcha y aceptación del sistema.
- Formación.
- Documentación (*).

En el caso de que se fabrique más de un sistema los costes marcados con (*) no han de computarse (solamente deben incluirse cuando se fabrique el primer sistema o prototipo).

Los *costes operativos* consideran las siguientes partidas:

- Mantenimiento del sistema.
- Sustitución de elementos.
- Costes de suministro (eléctrico, aire comprimido, etc.).
- Modificaciones en el producto.

PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Una imagen puede definirse básicamente como una función de dos dimensiones $f(x, y)$ dependiente de las coordenadas del plano x e y . Para cada par de valores x e y que definen un punto sobre el plano va a obtenerse un valor de la función f también denominado *intensidad* o *nivel de gris* de la imagen en un punto. Cuando las coordenadas y el valor de la función f son cantidades discretas la imagen puede definirse como *imagen digital* [180].

En el caso de que una imagen sea generada a partir de un proceso físico, los valores de la imagen van a ser proporcionales a la energía radiada por una fuente física. De esta manera, la función $f(x, y)$ podría caracterizarse a partir de la combinación de dos componentes:

1. Cantidad de iluminación que incide sobre la escena (o iluminancia): $i(x, y)$.
2. Cantidad de iluminación que es reflejada por los objetos de la escena (o reflectancia): $r(x, y)$.

El producto de estas dos componentes o funciones va determinar el valor de la función $f(x, y)$ [180, 181]:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (4.1)$$

Así, el *procesamiento digital de imagen* se define como la aplicación sobre la imagen $f(x, y)$ de una serie de algoritmos con la finalidad de mejorar la calidad de ésta y extraer más información de la disponible inicialmente [181]. Básicamente, los métodos de procesamiento de imagen van a producir una transformación de la imagen de entrada clasificándose entre aquellos cuya salida o resultado es otra imagen y aquellos cuyo resultado son una serie de atributos extraídos de la imagen de entrada [180].

Para poder procesar una imagen en un computador previamente se ha de digitalizar la intensidad luminosa distribuida espacialmente en el sensor. La digitalización de la coordenada espacial (x, y) se denomina *muestreo* de la imagen mientras que la digitalización de la intensidad luminosa se denomina *cuantificación* del nivel de gris. Se denomina *nivel de gris* de una imagen monocromática en una determinada coordenada espacial (i, j) a la intensidad luminosa existente en esa coordenada y *escala de gris* al rango de niveles de gris en los que está cuantificada la intensidad luminosa.

Una vez digitalizada, la imagen es representada generalmente como una matriz rectangular de $M \times N$ valores discretos que se corresponden con los distintos niveles de gris obtenidos del muestreo y cuantificación de todos los píxeles del dispositivo de captura de la imagen.

$$\begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Es muy común que los valores de M , N y la escala de gris sean potencias de base dos para facilitar su representación binaria. Así, por ejemplo, la representación de todos los niveles de gris en los que puede estar cuantificada una imagen se podría expresar de la forma siguiente:

$$L = 2^n \quad (4.3)$$

donde L es el número total de niveles de gris y n el número de bits en los que se desean codificar. De esta manera, para codificar 256 niveles de gris de una determinada imagen se necesitarían 8 bits.

El procesamiento que va a llevarse a cabo sobre la imagen digitalizada comprenderá una serie de etapas a distintos niveles de procesamiento. La figura 2.10 (capítulo 2 sección 2.4.1 muestra las principales etapas dentro del procesamiento digital de imágenes.

4.1 PREPROCESAMIENTO.

Durante la etapa de preprocesamiento se van a aplicar sobre la imagen algoritmos en el dominio espacial y/o frecuencial con una serie de objetivos:

- Resaltar ciertas características de la imagen que aumenten el contraste de los elementos que se pretenden extraer de ella respecto al fondo u otros elementos en la imagen.
- Realizar ciertas transformaciones y correcciones (seleccionar área de interés, corregir distorsiones introducidas por la óptica, transformar la imagen a nivel global para facilitar operaciones posteriores, etc.).
- Eliminar o reducir el ruido que contiene la imagen y cuyo origen puede provenir de distintas fuentes:
 - *Gausiano*. Provoca pequeñas variaciones en la imagen de tal manera que al valor ideal del píxel se le adiciona el valor de una variable que sigue una distribución normal o gaussiana. Está originado por las diferencias de ganancia en el sensor de adquisición de imagen, introducido por los elementos de conversión analógico/digital, interferencias en el canal de transmisión, etc.
 - *Impulsional*. El valor que tiene el píxel no guarda relación con el valor ideal sino con valores del ruido o muy altos o muy bajos. Es el ruido conocido como sal y pimienta.
 - *Frecuencial*. Cuando la imagen a procesar es la suma de la imagen ideal y una señal de interferencia caracterizada por una senoide de una determinada frecuencia.
 - *Multiplicativo*. Cuando la imagen a procesar es el producto de dos señales como, por ejemplo, una iluminación no homogénea de la superficie analizada.

Hasta hace unos años, el empleo de los métodos en el dominio frecuencial para aplicaciones de tiempo real resultaban difíciles de implementar. Con el aumento progresivo de la capacidad de procesamiento del hardware este impedimento se ha superado y, hoy en día, muchas de las técnicas de detección y clasificación de defectos utilizan el dominio frecuencial y el conjunto espacial / espacial-frecuencial.

El realce de defectos en el dominio espacial puede realizarse mediante métodos píxel a píxel y métodos en el entorno de vecindad.

Las operaciones fundamentales dentro de la etapa de preprocesamiento vienen especificadas en el capítulo 2 (sección 2.5.2).

4.1.1 Heterogeneidad de la iluminación.

La iluminación no homogénea de la zona de inspección puede estar originada por la aplicación de una configuración o fuente de iluminación inadecuada, la desalineación del sistema de iluminación y/o de los componentes ópticos, reflexiones producidas por la propia topología del objeto a inspeccionar, desgaste de elementos, etc.

La problemática que introduce esta iluminación tiene una especial incidencia cuando se aplican técnicas de segmentación basadas en umbralización global. Así, las variaciones de iluminación captadas por la cámara y reproducidas en la imagen pueden distorsionar la forma del histograma haciendo difícil o imposible encontrar un umbral adecuado que separe el objeto de interés del fondo.

En ocasiones resulta imposible conseguir una iluminación homogénea y hay que recurrir a una serie de métodos que tratan de corregir la imagen adecuándola para una etapa posterior de procesamiento. A continuación, se muestran algunos de estos métodos de corrección.

Sustracción de modelo de iluminación.

Uno de los métodos que podrían emplearse para corregir los efectos de la iluminación no homogénea consiste en la sustracción de la imagen original $f(x, y)$ de un modelo o superficie de iluminación $h(x, y)$ cuyo resultado sea la imagen corregida $g(x, y)$:

$$g(x, y) = f(x, y) - h(x, y) \quad (4.4)$$

La obtención de la función modelo $h(x, y)$ se puede realizar mediante varios métodos. Dos de ellos, son los siguientes:

- Subdivisión de la imagen.
 - Fragmentación de la imagen en bloques de un determinado tamaño $a \times b$.
 - Promediado del nivel de gris (o filtrado paso-bajo) de los elementos individuales de cada bloque. El tamaño será grande como para poder capturar el defecto pero no excesivamente ya que se perdería información sobre la variación de la iluminación a lo largo de la superficie de la imagen.
 - Escalado de los valores obtenidos.
 - Interpolación de los valores promedio obtenidos de cada bloque para crear la superficie modelo $h(x, y)$.
- Subdivisión de la imagen con solapamiento. Se ejecutan los mismos pasos que en el método anterior pero los bloques en los que subdivide la imagen tienen un cierto grado de solapamiento vertical y horizontal entre ellos. Se obtienen un mayor número de puntos que permiten construir un modelo más aproximado pero a un mayor coste computacional.
- Aplicación de filtro de suavizado gaussiano. La construcción del modelo $h(x, y)$ es directa mediante la convolución con la imagen original de una máscara de filtro de suavizado gaussiano.

Cualquiera de los tres métodos pueden ser válidos para la corrección de la imagen. La elección de uno u otro método vendrá dada por la calidad del resultado de la corrección y del coste computacional del método.

Modelo de iluminación a partir de imagen de referencia.

Está basado en la obtención de una imagen de referencia que se utiliza para construir el modelo de corrección de la imagen. En general, esta técnica puede aplicarse cuando el proceso de adquisición de la imagen de referencia se encuentra totalmente controlado. Para adquirir la imagen de referencia, se proyecta el patrón de iluminación sobre una superficie reflectiva blanca continua [180]. De esta manera, cualquier variación existente sobre la imagen de referencia estará ocasionada por la variación de la iluminación y ruido presente.

La corrección de la imagen a partir de la imagen de referencia no se suele realizar directamente punto a punto ya que podría aumentar la cantidad de ruido sobre la imagen corregida. La forma de evitar este problema es dividir la imagen a corregir por un modelo de la imagen de referencia construido mediante un polinomio de interpolación de orden bajo.

Subdivisión de imágenes.

Uno de los métodos que también suele emplearse con iluminación no homogénea se basa en la división de la imagen original en pequeñas subimágenes donde las variaciones producidas por la iluminación son generalmente pequeñas.

La aplicación de este método supone un procesamiento local de la imagen donde las subimágenes son procesadas de manera individual. Este tipo de procesamiento tiene también sus inconvenientes los cuales deberán ser tenidos en cuenta durante el procesamiento (posible aumento del coste computacional, efectos frontera en subimágenes contiguas, etc.).

Filtrado homomórfico.

Los efectos de la iluminación no homogénea también se pueden corregir mediante el filtrado homomórfico. Se trata de una técnica desarrollada en el dominio de la frecuencia que se fundamenta en la separación de las componentes de la iluminación $i(x, y)$ y la reflectancia $r(x, y)$ de una imagen $f(x, y)$ (ecuación 4.1). Bajo esta hipótesis, la heterogeneidad de la iluminación es considerada un ruido de tipo multiplicativo [178].

En el dominio espacial, la componente de la iluminación de una imagen se caracteriza por variar lentamente mientras que la componente de reflectancia tiende a variar rápidamente sobre todo en aquellas zonas donde se produce una transición objeto-fondo.

Si sobre la ecuación 4.1 se aplica una transformación logarítmica la nueva imagen $z(x, y)$ será la siguiente:

$$z(x, y) = \ln [f(x, y)] = \ln [i(x, y)] + \ln [r(x, y)] \quad (4.5)$$

De esta manera, el ruido que anteriormente era multiplicativo se comporta ahora como aditivo. Aplicando la transformada de Fourier:

$$\mathcal{F}\{z(x, y)\} = \mathcal{F}\{\ln [f(x, y)]\} = \mathcal{F}\{\ln [i(x, y)]\} + \mathcal{F}\{\ln [r(x, y)]\} \quad (4.6)$$

la imagen en el dominio de la frecuencia $Z(u, v)$ quedará como:

$$Z(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (4.7)$$

A continuación, se filtra la imagen $Z(u, v)$ por un filtro paso-alto $H(u, v)$ (por ejemplo, mediante un filtro paso alto gaussiano [180, 173]) cuya operación se corresponde con una convolución discreta de ambas funciones siendo $S(u, v)$ la función filtrada:

$$S(u, v) = H(u, v) * Z(u, v) = H(u, v) \otimes I(u, v) + H(u, v) \otimes R(u, v) \quad (4.8)$$

Solamente queda deshacer las transformaciones empleadas a partir de la función filtrada $S(u, v)$ para obtener una imagen donde los efectos de una iluminación no homogénea han sido minimizados.

4.1.2 Suavizado con preservado de bordes.

Cuando se aplican filtros de promediado en el entorno de vecindad con la intención de obtener una imagen libre de ruido, por ejemplo de tipo gaussiano, se produce un suavizado de la imagen que elimina o disminuye en gran medida el ruido. En ocasiones, este suavizado no interesa que se aplique de forma global ya que difumina o desdibuja ciertas zonas de transición objeto-fondo que podrían resultar de interés para un posterior procesamiento de la imagen. Fundamentándose en esta idea, el algoritmo va a reducir el ruido en las imágenes y, a la vez, intentar preservar los bordes.

Diversos algoritmos relativamente complejos basados en la misma idea son el filtrado bilateral, el filtrado guiado, la difusión anisotrópica y modificaciones sobre el filtro adaptativo de Wiener para el preservado de bordes. El algoritmo más simple y sencillo de suavizado con preservado de bordes se propuso en 1979 por Nagao [182]. Éste puede implementarse siguiendo los siguientes pasos [173]:

1. Rotación de una máscara rectangular alrededor de un determinado punto (i, j) de la imagen.
2. Determinar la posición de la máscara donde la varianza del nivel de gris es mínima. Determinar también si existe una posición de la máscara cuyo valor de varianza supere un determinado umbral α ya que donde hay bordes se producirán valores elevados de varianza.
3. Si no se supera el umbral de varianza α se considerará que no existe borde en el entorno de vecindad y se asignará un nuevo valor del nivel de gris equivalente al promedio de la máscara centrada en el punto (i, j) . En caso contrario, se mantendrá el nivel de gris de la imagen original.
4. Repetir pasos de 1 a 3 con todos los píxeles de la imagen.
5. Si se desea acentuar aún más el suavizado se repetirán los pasos anteriores un determinado número de iteraciones, o bien, hasta que el nivel de gris de todos los puntos no haya superado un umbral β prefijado entre dos iteraciones sucesivas.

El procesamiento de este algoritmo se fundamenta en la operación de *convolución discreta bidimensional*, una de las operaciones más conocidas e importantes dentro del procesamiento de imagen con unas propiedades más que interesantes (conmutativa, asociativa, linealidad e invarianza a las traslaciones).

Así, dada una imagen $f(x, y)$ y una máscara de convolución o kernel $h(k, l)$ la operación de convolución $h * f$ realizada para una determinada coordenada de la imagen (i, j) dará como resultado un nuevo valor de intensidad luminosa $g(i, j)$ [65]:

$$g(i, j) = \sum_{k, l} h(k, l) \cdot f(i - k, j - l) \quad (4.9)$$

Se puede intuir la problemática que origina la operación de convolución en aquellos píxeles cercanos a los bordes de la imagen donde ciertos valores requeridos para la realización de la convolución quedarían fuera de la imagen. Para compensar estos problemas se utilizan una serie de modos de extensión o *padding* de la imagen:

- *Cero (zero-paddding)*. Valores externos de las dimensiones de la imagen son puestos a valor cero.
- *Constante*. Los valores externos son puestos a un mismo valor escogido del borde.
- *Replicación del borde*. Los valores externos son replicados a partir de los valores del borde.
- *Cíclico*. Se repite el patrón de los píxeles cercanos al borde de la imagen a modo de espejo, restando el valor de los píxeles de la imagen espejo de los niveles de los píxeles del borde, etc.

El número de operaciones N_{Op} requeridas para la realización de una operación de convolución discreta bidimensional realizada sobre una imagen completa de $M \times N$ (filas x columnas) por una máscara de convolución de dimensiones $P \times Q$ (filas x columnas) es $N_{Op} = MNPQ$. En el caso de que la máscara fuera separable en un vector horizontal y otro vertical, permitiendo dos operaciones de convolución discreta unidimensional secuenciales, la complejidad computacional se reduce a $N_{Op} = MN(P + Q)$.

Cálculo eficiente de la varianza local.

Consideremos que deseamos calcular la varianza σ^2 de una serie de números x_i donde $i = 1, 2, \dots, N$ y cuyo valor medio es μ . El valor de la varianza será:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (4.10)$$

Si se desarrollan los términos internos del sumatorio (ecuación 4.11) y se simplifican (ecuación 4.12), la ecuación 4.13 muestra el valor de la varianza local.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + \mu^2 - 2 \cdot x_i \cdot \mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2) + \mu^2 - \frac{2 \cdot \mu}{N} \sum_{i=1}^N (x_i) \quad (4.11)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2) + \mu^2 - 2 \cdot \mu^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2) - \mu^2 \quad (4.12)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2) - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i) \right]^2 \quad (4.13)$$

Para poder seleccionar la posición de la máscara donde la varianza es mínima (o determinar que la varianza local supera un determinado umbral α) se puede usar el siguiente algoritmo:

1. Operación de convolución completa de la imagen original $f(x, y)$ por una máscara de promediado cuyo resultado será el array A.
2. Elevar al cuadrado los elementos del array A dando lugar al array B.
3. Construcción de un nuevo array C cuyos valores serán los valores de $f(x, y)$ elevados al cuadrado.
4. Operación de convolución completa del array C por una máscara de promediado cuyo resultado será el array D.
5. Sustraer del array D el array B cuyo resultado será el array E cuyos valores individuales serán las varianzas locales en cada posición (i, j) de la imagen.
6. Recorrer el array E de varianzas y seleccionar de las varianzas vecinas, según la máscara de convolución elegida (3×3 , 5×5 , etc.), los valores máximos y mínimos para poder aplicar el algoritmo de preservado de bordes.

4.2 SEGMENTACIÓN.

La *segmentación* es un método de procesamiento que subdivide una imagen en las regiones u objetos que la constituyen formado regiones independientes y homogéneas ([181]) donde el grado de subdivisiones a alcanzar dependerá del problema concreto a resolver. El propósito principal de la segmentación es obtener directamente o facilitar la obtención de más información de la región o regiones de interés dentro de la imagen. La segmentación se dará por concluida cuando la región o regiones de interés han sido completamente aisladas [180]. La forma de agrupar los píxeles en regiones estará determinada por una serie de características basadas fundamentalmente en tres conceptos básicos [173]:

- Similitud. Los píxeles que pertenecen a una región tienen valores similares en alguna o varias propiedades.
- Conectividad. Los píxeles pertenecientes a una región se encuentran agrupados de forma contigua.
- Discontinuidad. La región tiene unos bordes definidos y destaca del entorno.

Dentro de las etapas que comprenden la visión por computador, la segmentación suele establecerse en un nivel intermedio entre los procesamientos más básicos y los más complejos. Cuando la segmentación se realiza sobre imágenes no tan triviales puede llegar a convertirse en unas de las tareas más complejas del procesamiento de imagen [180]. Para complicarlo aún más, no hay una teoría para la segmentación de imágenes por lo que tampoco existe un método general o estándar que haya destacado, más bien, una colección de métodos específicos que a lo largo del tiempo han recibido cierto grado de popularidad [183].

La segmentación puede ser completa dando como resultado un conjunto de regiones separadas que se corresponden únicamente con objetos de la imagen de entrada. En cambio, también podría dar como resultado regiones que no se corresponden directamente con objetos de la imagen produciéndose lo que se denomina una segmentación parcial [184]. Así, en el caso de la segmentación completa de una imagen R se generarán un conjunto finito de regiones R_1, R_2, \dots, R_n cumpliendo las dos condiciones siguientes:

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (4.14)$$

$$R_i \cap R_j = \emptyset \mid i \neq j \quad (4.15)$$

En el caso de que la segmentación cumpla solo una de las dos condiciones se considerará una segmentación parcial. Generalmente, para lograr una segmentación completa será necesario un mayor nivel de procesamiento aplicando cierto conocimiento específico del problema. Sin embargo, existen ciertos casos donde la segmentación puede alcanzar el éxito requerido usando exclusivamente procesamiento de bajo nivel. Para que ésto pueda ocurrir es necesario que los objetos a detectar tengan un cierto grado de contraste respecto al fondo sobre el que se encuentran situados.

La tabla 4.1 muestra una comparativa de los métodos básicos aplicados para la segmentación de imágenes.

Parámetro	Basadas en Umbralización	Basadas en Discontinuidades	Basadas en Regiones
Imagen de Salida	Binaria	Binaria	Binaria
Información Espacial	Ignorada	Considerada	Considerada
Continuidad de la Región	Moderada	Moderada	Elevada
Coste Computacional	Bajo	Intermedio	Alto
Velocidad Procesamiento	Elevada	Moderada	Lenta
Inmunidad al Ruido	Baja	Baja	Baja
Detección de múltiples objetos	Pobre	Pobre	Moderada
Precisión Segmentación	Intermedia	Intermedia	Buena

Tabla 4.1: Comparativa de métodos de segmentación de imágenes.

4.2.1 Umbralización.

Uno de los métodos más simples de segmentación de imágenes es la umbralización donde los elementos a segmentar son separados a partir de los niveles de intensidad en la imagen y una función umbral. La salida de una operación de umbralización es una imagen binaria $g(x, y)$ en la que un estado se corresponde con el objeto de interés y el otro con el fondo.

La umbralización generalmente es bastante rápida y simple pudiéndose realizar en tiempo real [185]. Gracias a su simplicidad de implementación y elevada velocidad de procesamiento, la umbralización es uno de los métodos de segmentación de imagen más populares [186].

El resultado de la umbralización de una imagen cuantificada en niveles de grises $f(x, y)$ es una imagen binaria $g(x, y)$, en la cual, cada posición (x, y) de la imagen podrá pertenecer a un estado o a su complementario, es decir, pertenecerá al objeto o al fondo. Esta separación entre objeto y fondo se realiza en base a los niveles de intensidad existentes en la imagen y a una determinada función umbral T .

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (4.16)$$

donde $p(x, y)$ puede ser una propiedad local (promedio, varianza, etc.) en el entorno de vecindad del punto (x, y) .

La función T se denominará *umbral global* si solamente depende de $f(x, y)$, *umbral local* si depende de $f(x, y)$ y $p(x, y)$ y *umbral dinámico o adaptativo* si además depende de las coordenadas espaciales (x, y) . De esta manera, la imagen umbralizada $g(x, y)$ se define como:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (4.17)$$

Los inconvenientes de una segmentación de imagen aplicando técnicas de umbralización son los siguientes:

- Es sensible tanto al ruido no estacionario como al correlado.
- Sensible a la iluminación ambiente.
- La umbralización se complica o incluso se imposibilita ante un contraste inadecuado o insuficiente entre el objeto de interés y el fondo.
- Entraña gran dificultad cuando el objeto de interés y la escena son dispares en tamaño.
- No tiene en cuenta la información espacial por lo que pierde parte de la información de la imagen que podría ser útil o necesaria.
- El valor de elección del umbral T es crítico por lo que una mala elección de éste puede causar una segmentación incorrecta.

Taxonomía de los algoritmos de umbralización.

Los algoritmos de umbralización pueden categorizarse según el tipo de información que utilizan [187, 188, 189]:

- *Métodos basados en la forma del histograma.* Analizan la forma del histograma de la imagen (mínimos, máximos, curvaturas, etc.) para seleccionar el umbral más adecuado.
 - Umbralización por cáscara convexa [190]. Analiza las concavidades del histograma donde los puntos de concavidad más profundos se convierten en candidatos a umbral. En caso de que existan varios candidatos se analizará algún atributo del objeto para seleccionar el umbral más apropiado. Existen variaciones sobre este método [191, 192, 193, 194, 195].
 - Umbralización mediante picos y valles [196]. Analiza los picos y valles aplicando un suavizado y diferenciado iterativo del histograma. Reducción paulatina del histograma a dos lóbulos finales mediante fusión según unas condiciones establecidas (sensibilidad a la detección del pico y cercanía entre picos). Tomando como base este método se han realizado algunas variaciones [197, 198, 199, 200].
 - Umbralización mediante modelado de la forma del histograma. Aproximan el histograma a algún tipo de función: distribución acumulada [201, 202], espectro de potencia de señales exponenciales multicomplejas [203], basado en criterios discriminantes [204], etc.

- Umbralización mediante histogramas laterales. Mediante este método los valores de los píxeles se suman independientemente por filas y columnas para obtener dos histogramas laterales. Una vez contruídos, se analizan ambos histogramas aplicando alguna de las técnicas anteriores y se obtienen ciertas relaciones entre ellos que permiten definir el umbral más apropiado. Suele ser una técnica bastante empleada para la localización de objetos dentro de una imagen.
- *Métodos basados en agrupación.* Los niveles de gris de la imagen son agrupados en dos grupos, objeto y fondo, los cuales forman dos lóbulos distintos del histograma.
 - Umbralización iterativa [205, 206, 207, 208]. Se trata de métodos iterativos basados en la modelización, bajo ciertas asunciones, del histograma en dos distribuciones gaussianas de las que se obtienen ciertos índices (promedio, desviación estándar, entropía, etc.) tras aplicar un determinado umbral. Posteriormente se recalcula un nuevo umbral y se compara con el anterior. El algoritmo se detiene cuando el umbral, que ha convergido a un determinado valor, finalmente se estabiliza dentro de unos márgenes. Este tipo de algoritmos tiene el inconveniente de que cuando las asunciones que se realizan comienzan a distanciarse de la realidad el umbral obtenido contendrá cierto grado de error.
 - Umbralización mediante agrupamiento. Son métodos en los cuales el problema de la umbralización se formula como un análisis discriminante. El método de Otsu [209] sigue siendo uno de los más conocidos y referenciados algoritmos de umbralización. Supone que el histograma es la suma de dos gaussianas y trata de establecer un umbral óptimo de separación de las dos clases maximizando la dispersión entre ellas. Se obtienen buenos resultados cuando el número de píxeles de cada clase es similar. Sobre este método se han realizado distintas variaciones y discusiones. En [210] se aplica el algoritmo Isodata de división y fusión de clases, en [211] se acota el ámbito de aplicación del método Otsu y en [212] generaliza el algoritmo de Otsu a dos dimensiones
 - Umbralización por minimización de error. Estos métodos tratan de encontrar un umbral que minimice una determinada función asumiendo que la imagen puede caracterizarse como una mezcla de distribuciones. Una de las ventajas de este tipo de métodos es que son bastante robustos en la separación de clases aún cuando el tamaño de una de las dos clases sea bastante menor que la otra. En cambio, son métodos susceptibles al ruido en la imagen. En [213] se trata de minimizar el error de clasificación de clases, en [214, 215] se minimiza el error de ajuste del histograma a las funciones gaussianas y en [216] se realiza una mejora de éste último.
 - Umbralización mediante agrupamiento borroso [217, 202]. Tratan de asignar cada píxel de la imagen a alguno de los dos grupos borrosos definidos a partir del valor de una determinada función distancia entre cada píxel y clase borrosa.

- *Métodos basados en la entropía del histograma.* Usan la entropía de la distribución de los niveles de píxeles del objeto y del fondo.
 - Umbralización entrópica. Se basan en el hecho de que maximizar el valor de la suma de la entropía de las dos clases de una imagen umbralizada es indicativa de una transferencia de información máxima. Es decir, la entropía puede utilizarse como una medida de separación. El punto donde se encuentre el valor máximo de esta suma se corresponderá con el umbral que separa ambas clases de forma óptima. Basándose en esta idea, se han desarrollado algoritmos relativamente conocidos como son el método de Pum [218, 219], el método de Kapur [220] y una variación sobre éste [221] y métodos que emplean la entropía de Renyi [222].
 - Umbralización mediante entropía cruzada. Utilizan la entropía cruzada entre la imagen original y la imagen umbralizada a modo de preservar el nivel de información en la imagen. Estos algoritmos tratan de minimizar el valor de la distancia de Kullback-Leibler para encontrar el umbral óptimo [223, 224], minimizar la entropía cruzada [225] o maximizar unas funciones basadas en el principio de máxima entropía [226, 227].
 - Umbralización entrópica borrosa. En [228] se definen unas funciones de entropía borrosa y utilizan las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos para determinar el grado de pertenencia de los píxeles al objeto o fondo según un umbral determinado. El valor del grado de pertenencia es sustituido en las entropías borrosas y se calcula el valor absoluto de su diferencia. El umbral óptimo será aquel que minimice esta diferencia. Basándose en la misma sistemática, en [229] se define otra función diferente para la entropía borrosa y se trata de maximizar.
- *Umbralización basada en atributos de similaridad.* Utilizan medidas de similaridad o calidad entre la imagen original y la binarizada (forma, coincidencia de bordes, etc.) para seleccionar el umbral más adecuado.
 - Umbralización mediante preservado de momentos. Este tipo de algoritmos establecen el umbral mediante el casamiento entre los tres primeros momentos matemáticos de la imagen de nivel de gris y la imagen binarizada resultado de la umbralización [230]. En [231] se realiza una variación del algoritmo donde se plantea resolver las ecuaciones de preservado de momentos a través de una red neuronal recurrente y en [232] resuelve las ecuaciones relacionándolas con un problema de cuadratura mecánica de Gauss-Jacobi.
 - Umbralización mediante casamiento de bordes. La idea fundamental de estos algoritmos consiste en que el umbral óptimo es aquel que maximiza la coincidencia de bordes entre la imagen de nivel de gris y la binarizada [233, 234].
 - Umbralización mediante similaridad borrosa. El umbral óptimo para segmentar una imagen es aquel que minimiza un determinado índice difuso definido en base a la teoría de conjuntos borrosos [235, 236]. En [237] el índice difuso es considerado como una medida de distancia entre la imagen de nivel de gris y la binarizada y en [238] se evalúa el rendimiento de varios índices propuestos (índice difuso lineal y cuadrático y medidas de entropía logarítmica y exponencial).

- Umbralización topológica de estado estable. Esta técnica se definió a partir de la observación de las acciones que realizaban ciertos expertos para conseguir el enfoque de los elementos de interés que estudiaban a través del microscopio [239]. Partiendo de esta idea, en [240] se determina el umbral óptimo cuando los objetos consiguen alcanzar el tamaño correcto.
- Umbralización de información máxima [241]. Consideran el problema de la umbralización como la variación del grado de incertidumbre entre las clases objeto y fondo. El umbral óptimo coincidirá con el punto donde la incertidumbre alcanza su máximo decrecimiento que, a su vez, será donde la imagen de nivel de gris contiene tanta información como la imagen binarizada.
- Umbralización mediante compactación borrosa [242, 243]. Este tipo de técnicas aplican la teoría de conjuntos borrosos para extraer un índice basado en la compactación de los conjuntos que pertenecen a los objetos segmentados. La maximización de este índice determinará el umbral óptimo. La ventaja que tienen este tipo de algoritmos sobre los que umbralizan mediante similitud borrosa es que el índice de compactación contempla más información (geometría de los objetos: área y perímetro) que los índices difusos.
- Otros algoritmos [244, 245, 246, 247, 204, 248, 212, 249, 250, 251, 252]. Se tratan de algoritmos de umbralización basados en atributos de similitud que no están incluidos en los grupos anteriores.
- *Información espacial.* Basados en el análisis estadísticos de distribuciones de probabilidad y/o correlaciones entre píxeles (probabilidades de contexto, funciones de correlación, probabilidades de coocurrencia, modelos locales de dependencia lineal, entropía en dos dimensiones, etc.).
 - Umbralización basada en coocurrencia. Métodos basados en la construcción de la matriz de coocurrencia de una imagen de gris de la que se extraen índices que posteriormente son utilizados para determinar el umbral más adecuado [253, 254, 255]. En [256] se introduce una mejora mediante un método que reduce el coste computacional de la construcción de la matriz de coocurrencia y propone otros índices diferentes.
 - Umbralización mediante histograma de dos dimensiones [257, 258]. Están basados en la construcción de un histograma de dos dimensiones a partir del valor de nivel de gris y del promedio del entorno de vecindad de los píxeles. La superficie que se forma contiene dos picos separados por un valle que se corresponden con el objeto y el fondo. El umbral se puede determinar maximizando la entropía entre el objeto y el fondo. En [259] se mejora el método acelerando la búsqueda del umbral, [260] introduce la lógica borrosa para la construcción del histograma y [229] clasifica el histograma en regiones difusas de objeto y fondo a partir de la ecuación de entropía de Zadeh, [261] investiga sobre la proyección lineal de Fisher del histograma y [262, 263, 264] redefine el cálculo de las entropías del objeto y del fondo y aplica el máximo del mínimo para obtener el umbral.
 - Umbralización basada en conjuntos aleatorios [265, 266]. La idea básica de este tipo de algoritmos es considerar una imagen como un conjunto aleatorio del cual se extraen unos índices basados en distancias que se utilizan para determinar el umbral.

- *Características locales.* Algoritmos basados en la adaptación de la función umbral a características locales de la imagen como la media, mediana, varianza, contraste, etc. donde el umbral $T(x, y)$, con el que cada píxel es clasificado, será función de su posición (x, y) .
 - Umbralización basada en la varianza local. Adapta el umbral en función de la media y la desviación estándar de una ventana local de $b \times b$ elementos que recorre la imagen completa [267]. La desviación estándar es compensada mediante un parámetro k de ajuste. En [268] fijan un tamaño de ventana de 15×15 y el parámetro de ajuste $k = -0,2$ con unos resultados satisfactorios. Una versión mejorada y adaptada a la segmentación de documentos se expone en [269]. En [270], se añade a la función de umbralización el valor del nivel de gris mínimo de la ventana y en [271] se utilizan dos ventanas circunscritas para determinar el umbral más apropiado.
 - Umbralización basada en el contraste local. Algoritmos que se fundamentan en adaptar el umbral al contraste existente en el entorno de vecindad del elemento considerado [272]. En [273], primeramente se expande el rango dinámico de la imagen y posteriormente se aplica un suavizado con preservado de bordes. Una adaptación del tamaño de la ventana al tamaño del objeto que se pretende extraer de la imagen se presenta en [274]. En [275], se muestra una comparativa de este tipo de métodos.
 - Umbralización basada en centro-vecindad. Consiste en la aplicación de una serie de máscaras de $b \times b$ elementos dispuestas entorno al elemento considerado con la finalidad de disponer de mayor información del entorno de vecindad. Así, [276] dispone de 5 máscaras de 3×3 elementos una centrada en el elemento sobre el que se aplica la función umbral y las otras cuatro centradas sobre los 4 elementos diagonales de la primera. En [277], se utilizan máscaras del tamaño del objeto a extraer entorno a la máscara central y en [278], se mejora este último algoritmo aplicando una serie de condiciones de contorno.
 - Umbralización mediante ajuste de superficie. Se fundamentan en la construcción de una superficie de umbralización a partir de información del nivel de gris y de los bordes [279]. El umbral se obtiene mediante la aplicación de operadores de segunda derivada sobre la superficie de umbralización. En [280], se construye la superficie en base a un problema de optimización de superficie resuelto por una red neuronal de Hopfield. Una construcción de dos superficies en las que a cada elemento se le asigna el gradiente y la desviación de éste en el entorno de vecindad para posteriormente aplicar la función de umbralización se muestra en [281]. En [282], la superficie construida representa el gradiente de cada elemento en la imagen conmutando entre una umbralización global y local en función del gradiente y en [283] la umbralización se basa en un análisis multi-resolución de Hadamard.

- Método Kriging. Método basado en la aplicación de dos etapas de umbralización secuenciales [284]. En la primera, se selecciona un umbral global basado en el método de Kapur, por debajo del cual, los elementos de la imagen son asignados a la clase objeto. Seguidamente se aplica un segundo umbral, muy por encima de éste, para clasificar aquellos elementos que con seguridad pertenecen al fondo. En la segunda etapa, los elementos que no han sido clasificados previamente en ninguna clase (se encuentran en el rango comprendido entre los dos umbrales anteriores) son clasificados a la clase objeto o fondo a partir de un indicador de Kriging.
- Umbralización basada en subimágenes. Cuando el grado de uniformidad del fondo de la imagen no es adecuado, como por ejemplo ante una iluminación de la superficie no homogénea, una forma de plantear la umbralización es dividir la imagen completa en subimágenes y, sobre cada una de ellas, aplicar alguno de los métodos de umbralización definidos para determinar el umbral óptimo. El umbral obtenido en cada subimagen segmenta los píxeles que forman parte de esta subimagen. En ciertos casos, esta forma de umbralización puede ocasionar que los píxeles localizados en las fronteras de subimágenes contiguas tengan umbrales bastante diferentes cuando, en realidad, deberían de ser parecidos. Para solventar esta situación, se pueden aplicar dos estrategias. Por un lado, realizar una interpolación entre los umbrales obtenidos para cada subimagen creando una superficie de umbralización que es función de la posición de cada píxel a cambio de un relativo incremento en el coste computacional. Por otro lado, realizar un cierto solape entre las subimágenes que tiene el inconveniente de incrementar el coste computacional que será tanto mayor cuanto más grande sea este solape.

4.2.2 *Métodos basados en discontinuidad.*

Los métodos basados en discontinuidad se fundamentan en el principio de la variación de intensidad entre los píxeles. Así, cualquier cambio abrupto significativo en una determinada dirección entre los niveles de intensidad de píxeles vecinos puede considerarse como una discontinuidad entre ellos o más comúnmente un borde.

La detección de los bordes, por lo general, suele realizarse en tres pasos: un suavizado de la imagen para la eliminación de ruido seguido de una detección y localización del borde. Para la detección de los bordes es usual el empleo de técnicas basadas en operadores o máscaras basadas en el gradiente de primera (Roberts, Prewitt, Kirsch, Frei-Chen, etc.) y segunda derivada (Laplaciana, Laplaciana de la Gausiana, diferencia de Gausianas, operador de Canny, etc.). También es frecuente el uso de operadores morfológicos.

En general, los métodos basados en discontinuidad suelen dar unos resultados intermedios a un coste computacional moderado y, de entre todos ellos, los operadores de segundo orden son quizás los que dan una detección de bordes más fiable. Uno de los problemas que puede darse con este tipo de métodos es que los bordes obtenidos no sean continuos y requieran de un procesamiento adicional de reparación basado, por ejemplo, en operaciones morfológicas. Por otro lado, dependiendo de la complejidad de la imagen, es posible que sea necesario utilizar operadores extendidos con máscaras de mayor tamaño para obtener unos buenos resultados lo que implicaría un mayor coste computacional.

4.2.3 Métodos basados en regiones.

Los métodos basados en regiones operan bajo el principio de homogeneidad entre agrupaciones de píxeles, es decir, considerando el hecho de que píxeles vecinos perteneciente a una región poseen características similares entre sí (textura, nivel de gris, etc.) y distintas a los píxeles pertenecientes a otras regiones. Por tanto, el objetivo de la segmentación basada en regiones es generar regiones homogéneas dentro de la imagen.

Esta generación de regiones se puede llevar a cabo mediante distintos métodos:

- Crecimiento de regiones (*region growing*). Los píxeles son agrupados en regiones de mayor tamaño basándose para ello en unos criterios de similaridad.
- División y unión de regiones (*split and merge*). La imagen es dividida de forma iterativa en regiones más pequeñas y éstas a su vez comparadas con regiones adyacentes para su fusión de acuerdo a ciertos criterios de similaridad entre regiones.
- Líneas de división (*watershed*). Aunque es un método basado en regiones, requiere la extracción de las fronteras de éstas aplicando métodos de detección de bordes por lo que es considerado también un método híbrido. Este método está basado en conceptos topográficos e hidrológicos y considera una imagen como una superficie topográfica donde los píxeles más claros se corresponden con crestas y los más oscuros con los valles.

Por lo general, los resultados obtenidos con estos métodos son superiores a otros métodos de segmentación, siempre y cuando, la selección de las condiciones de contorno iniciales (por ejemplo, la selección de las semillas o píxeles iniciales a partir de los cuales se adicionan píxeles vecinos en el caso del crecimiento de regiones) y la regla de parada del algoritmo se seleccionan correctamente.

4.3 POSTPROCESAMIENTO.

Las técnicas morfológicas son operaciones que pueden ser utilizadas tanto en etapas de preprocesamiento como postprocesamiento aunque, lo más común, es su utilización tras la etapa de segmentación ayudando a resolver ciertos problemas derivados de ésta. Algunos de los usos más frecuentes de las técnicas morfológicas son los siguientes:

- *Suavizado de bordes de regiones.* Puede ocurrir que los elementos obtenidos tras la segmentación presenten bordes irregulares con inclusiones o protuberancias y se deseen suavizar.
- *Separación de regiones.* En otras ocasiones puede interesar la separación de regiones que se encuentran unidas por *pequeños puentes* entre ellas.
- *Unión de regiones separadas.* Tras la segmentación puede ocurrir que regiones que en la realidad serían continuas formando una sola región se encuentran separadas e interesa unir las.
- *Cómputo de regiones o elementos.* Mediante procesos iterativos con distintas dimensiones de elementos estructurantes se puede realizar un conteo de regiones con intención, por ejemplo, de realizar una clasificación según tamaño.

Las técnicas de procesamiento morfológico están basadas en la aplicación de filtros espaciales no lineales sobre la imagen fundamentados en la morfología matemática cuyo objetivo principal es el análisis y tratamiento de estructuras geométricas.

Los conceptos básicos del procesamiento de imagen morfológico se basan en el álgebra espacial de conjuntos de Minkowski [285], estudios sobre topología de Matheron [286] y la generalización aportada por Serra a la morfología basada en retículos completos [287]. El ámbito de aplicación de estas técnicas contempla su utilización tanto con imágenes en niveles de grises como con binarias aunque, dentro de esta tesis, su aplicación se limitará a las imágenes binarias obtenidas del proceso de segmentación.

La idea básica a llevar a cabo sobre cada imagen binaria será, por tanto, recorrer toda la imagen con una máscara, denominada elemento estructurante, que va a reemplazar el valor binario de la posición (x, y) considerada de la imagen por otro valor binario resultado de aplicar una función que depende de los valores binarios de los píxeles existentes dentro de un entorno de vecindad de forma y tamaño definido. De esta manera, la estructura o forma de los objetos presentes en la imagen sufrirá algún tipo de modificación con idea de alcanzar un determinado efecto o resultado.

4.3.1 Conceptos básicos sobre morfología.

El objetivo principal de las transformaciones morfológicas es la extracción de estructuras geométricas de los conjuntos sobre los que se opera a partir de otro conjunto de geometría conocida denominado elemento estructurante. Las dimensiones y forma del elemento estructurante se seleccionarán conforme al conjunto sobre el que se va a operar y las formas que se desean extraer de éste.

La definición de ciertas operaciones morfológicas requieren de algunas consideraciones previas sobre la teoría de conjuntos y topología [178, 180, 173, 288].

- *Inclusión.* Un conjunto Y estará incluido en otro X , es decir $Y \subset X$, si todo elemento de Y pertenece a X ,

$$\forall y \in Y \Rightarrow y \in X \quad (4.18)$$

- *Complemento.* El complemento de X se define como X^c y está compuesto por todos los elementos que no pertenecen a X .
- *Unión.* La unión de los dos conjuntos X e Y , es decir $X \cup Y$, son todos los elementos que están incluidos en uno de los dos,

$$X \cup Y = \{x \mid x \in X \vee x \in Y\} \quad (4.19)$$

- *Intersección.* La intersección de dos conjuntos son los elementos que tienen comunes y se define utilizando los conceptos de unión y complemento,

$$X \cap Y = (X^c \cup Y^c)^c \quad (4.20)$$

- *Traslación.* Un conjunto X es trasladado por un vector v cuando cada uno de los elementos de ese conjunto sufre esa translación. Se denominará al nuevo conjunto X_v .

A cada transformación $\Psi(X)$ se le puede asociar una transformación dual $\Psi^*(X)$ que cumple:

$$\Psi^*(X) \rightarrow (\Psi(X^c))^c \quad (4.21)$$

Erosión.

La operación morfológica denominada erosión combina dos conjuntos utilizando una sustracción de vectores con un resultado de degradación de los elementos de la imagen binaria.

Dado un elemento estructurante simétrico respecto a su origen (generalmente es el centro del elemento aunque no siempre), la erosión de un conjunto X a partir del elemento estructurante \check{B} se define como:

$$X \ominus \check{B} = \{z \mid B_z \subseteq X\} \quad (4.22)$$

La ecuación está basada en la obtención de la reflexión de B sobre su origen y desplazándola por el valor z . El resultado de la operación de erosión provoca que aquellos elementos de la imagen que sean más pequeños que el elemento estructurante desaparecen completamente mientras que elementos conectados mediante *píxeles puente* son separados.

Así, cuando las fronteras de las regiones de la imagen son recorridas por el elemento estructurante, el efecto de la erosión será una disminución de las dimensiones de las regiones a partir de los píxeles que pertenecen a las fronteras.

Respecto a las dimensiones del elemento estructurante, a mayor dimensión del elemento estructurante \check{B} la operación de erosión tendrá un mayor grado de incidencia en la acción de degradación de los elementos de la imagen. Por otro lado, mayores dimensiones del elemento estructurante conllevarán un mayor coste computacional. La erosión también se puede realizar de forma iterativa degradando los elementos de la imagen en cada iteración que, de proseguir, terminaría con la eliminación de todos los elementos existentes en la imagen, es decir, la destrucción de la imagen.

Uno de los ejemplos más sencillos de uso de la erosión es para eliminar detalles de tamaño irrelevante de la imagen binaria como por ejemplo aquellos elementos resultado de la segmentación que puedan ser considerados como falsos positivos FP, es decir, elementos considerados como defecto cuando en realidad no lo son.

Dilatación.

La operación de dilatación combina dos conjuntos utilizando la adición de vectores resultando en el crecimiento progresivo de los elementos de la imagen binaria. Se usa principalmente para añadir píxeles a las fronteras de regiones, unión de regiones vecinas y relleno de huecos. Cuando se recorren con el elemento estructurante las fronteras externas o internas de las regiones, la dilatación va a tener como efecto el aumento de las dimensiones de las regiones a partir de los píxeles pertenecientes a las fronteras.

La operación de dilatación es la operación dual de la erosión de tal manera que puede definirse matemáticamente como:

$$X \oplus \check{B} = \{z \mid [B_z \cap X] \subseteq X\} \quad (4.23)$$

Al ser también la operación dual de la erosión se puede escribir como:

$$X \oplus \check{B} = \left(X^c \ominus \check{B} \right)^c \quad (4.24)$$

Como ocurría con la erosión, si se realiza un proceso iterativo de dilataciones la imagen binaria quedará finalmente destruida.

Apertura.

Una vez realizada una operación de erosión sobre una imagen no se puede recuperar la imagen original mediante la aplicación de una operación de dilatación, es decir, las dos operaciones no son conmutativas.

Aunque este hecho parece en principio un inconveniente, puede resultar útil ya que la información de las regiones que permanece tras una secuencia de operaciones erosión-dilatación se corresponde con los elementos constituyentes de las regiones libre de pequeños objetos o elementos ocasionados por el ruido.

En general, la operación de apertura va a suavizar los contornos de las regiones, rompe pequeños puentes de píxeles que unen regiones contiguas y elimina pequeñas protusiones.

De esta manera, se puede definir la operación de apertura como la secuencia de una operación de erosión seguida de una dilatación:

$$X \circ B = (X \ominus \check{B}) \oplus B \quad (4.25)$$

Cierre.

La idea en la que subyace la operación de cierre morfológico es construir un operador que tienda a recuperar la forma inicial de las regiones en la imagen que previamente han sido dilatadas. Por tanto, la operación de cierre estará compuesta por una operación de dilatación seguida de una erosión. El efecto básico de la operación de cierre es el suavizado de los contornos de las regiones pero, al contrario que la apertura, une regiones que se encuentran estrechamente separadas, cierra pequeñas hendiduras y huecos en los contornos y elimina pequeños agujeros.

La operación de cierre se puede definir como:

$$X \bullet B = (X \oplus \check{B}) \ominus B \quad (4.26)$$

4.4 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS.

Los elementos extraídos tras la segmentación de la imagen se han de transformar en otro tipo de datos más adecuados a las siguientes etapas del procesamiento de imagen, reduciendo el volumen de información y haciéndola más manejable pero sin perder información de valor o fundamental. Esta caracterización de los elementos es lo que se denomina *extracción de características* y puede realizarse de dos maneras diferentes.

- Si lo que se pretende es centrarse en las características externas de los elementos, es decir su forma, lo más adecuado sería obtener representaciones basadas en las fronteras (factor de forma, relación de aspecto, compactación, convexidad, redondez, solidez, etc.) mediante ajuste de rectas, curvas, funciones polinómicas, códigos encadenados, etc.
- Si el interés está en centrarse en las propiedades internas de los elementos las representaciones basadas en regiones serán las más apropiadas (estadísticos de primer y segundo orden: media, varianza, sesgo, curtosis, entropía, matrices de coocurrencia, etc.).

El éxito en la etapa posterior de clasificación de defectos dependerá, en gran parte, de una minuciosa y adecuada selección de estas características. Una vez extraídas las características, son normalizadas estableciéndolas dentro de la misma escala o rango con el fin de evitar problemas posteriores durante la clasificación. En ciertas ocasiones, las características extraídas son sometidas a un procedimiento de refinado donde, o bien, se trata de transformar el vector de características en otro análogo pero de menor número de elementos (análisis de componentes principales, análisis de factores, etc.), o bien, se realiza un procedimiento de selección optimizado basado en inteligencia artificial (algoritmos genéticos: ver imagen 2.8 en capítulo 3, sección 2.3).

4.5 CLASIFICACIÓN.

Seguidamente, las características extraídas de los elementos se procesan mediante la etapa de clasificación donde se realizará la asociación entre el patrón de datos de entrada o vector de características y dos o más clases. Esta clasificación es realizada por un clasificador que puede verse como un dispositivo con una serie de entradas y salidas. Si la clasificación genera una variable se denomina *regresión* mientras que si genera un número discreto que identifica una clase específica se denominará *clasificación* [185].

Para la realización del proceso de clasificación se utilizan varios tipos de clasificadores. Algunos de los más conocidos son los siguientes ([289, 178, 180, 290, 173, 185, 291]):

- *Clasificador bayesiano* (Naïve Bayes). Clasificador a priori basado en la teoría de probabilidades donde los datos de entrada se le suponen que siguen una distribución de probabilidad conocida.
- *Análisis discriminante lineal* (discriminante de Fisher, funciones de coste y riesgo, etc.).
- *Clasificadores de mínima distancia* (distancia euclídea, métrica de Minkovski, distancia de Mahalanobis, etc.).

- *Basados en agrupamiento* (algoritmo K-medias, algoritmo Isodata, algoritmo borroso C-medias, K-vecinos más cercanos, Min-Max, distancias encadenadas).
- *Árboles de decisión o clasificación*. Clasificador no paramétrico basado en un conjunto de condiciones organizadas según una estructura jerárquica. Se basan en el aprendizaje generado mediante muestras de entrenamiento.
- *Redes neuronales*. Clasificador no paramétrico basado en la imitación de las funciones cerebrales. Forman modelos computacionales paralelos que constan de unidades de proceso o neuronas adaptativas y masivamente interconectadas (retro propagadas, auto-organizadas SOM, funciones de base radial, de aprendizaje de cuantificación vectorial, etc.).
- *Máquinas de vectores soporte* (SVM). Clasificador no paramétrico supervisado usado para regresión y clasificación y que se basa en la construcción de un hiperplano o conjunto de ellos en un espacio multidimensional.
- *Basados en sistemas de inferencia de lógica borrosa*.
- *Algoritmos genéticos*.

En algunos casos pueden llegarse a *combinar varios tipos de clasificadores* para producir la clasificación final:

- *Reglas de votación*. Recopilación de los resultados de varios clasificadores que son sometidos a un sistema de votación del que, según la regla que se aplique (por ejemplo de mayoría, mayoría comparativa, etc.), se genera la clasificación final.
- *Formalismo bayesiano*. Usado con clasificadores que generan salidas basadas en probabilidad donde cada una de las clases resultantes tiene una probabilidad acumulada resultado de la aportación de probabilidad de cada clasificador individual.
- *Razonamiento evidencial*. Basado en la asociación de un grado de evidencia a cada fuente de información y en la aplicación de un sistema formal de reglas para obtener la clasificación final.
- *Redes neuronales múltiples*. Arquitectura en la que las salidas de varias redes neuronales conforman las entradas de la red neuronal de salida.

DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN LA PRODUCCIÓN DE ACERO

La variedad de defectos superficiales que los sistemas de inspección han de detectar y clasificar en los productos procedentes de la fabricación del acero inoxidable es diversa pudiendo ser exclusivos para un determinado producto o aparecer en varios tipos de productos (ver tabla 5.1). Los problemas o inconvenientes más comunes a los que suelen enfrentarse este tipo de sistemas son de diversa índole [292]:

- *Diversidad intra-clases / Similaridad entre clases.* Puede darse el caso de que las variaciones en las características de los defectos de una misma clase puedan llegar a ser lo suficientemente importantes como parecerse más a los defectos de otras clases que a los de la propia clase. Este aspecto tiene una mayor incidencia en la clasificación de los defectos complicando o, en el caso más extremo, imposibilitando la clasificación de algunos defectos.
- *Dinámica del proceso productivo.* Los defectos son susceptibles, en mayor o menor grado, a pequeños cambios producidos en las variables del proceso productivo pudiendo llegar a alterar las características del defecto (forma, tamaño, etc.).
- *Gran número de clases.* Un gran número de clases de defectos podría complicar más el problema de detección y clasificación de defectos.
- *Elevada transferencia de datos.* La adquisición y procesamiento de imágenes y datos supone un gran intercambio de información entre los distintos elementos que integran el sistema de inspección lo cual se complica sobremanera cuando existen además restricciones de tiempo real.
- *Repositorio de datos sobre defectos.* En la industria, debido a diversos motivos (productivos, infraestructura informática, políticos, etc.), puede resultar difícil disponer de un adecuado repositorio de defectos que sirvan de base para su caracterización y análisis.

Aunque a lo largo del tiempo se han publicado numerosos trabajos sobre sistemas de inspección aplicados a distintos tipos de industrias, las publicaciones relacionadas con la inspección superficial del acero se desarrollan como investigaciones realizadas por instituciones académicas, por los propios fabricantes de equipos de inspección y colaboraciones entre instituciones académicas y productores de acero [293]. La mayoría de estos trabajos suelen estar orientados a describir genéricamente el sistema de inspección y los resultados y beneficios que se han obtenido con él careciendo u obviando detalles sobre las técnicas de detección y clasificación de defectos que han sido empleados en ellos [294].

Producto	Defectos
Desbaste (Slab)	Grietas en superficie y esquinas, picaduras (pequeños agujeros ocasionados por corrosión), arañazos/rayas, material sobrante.
Chapa Gruesa (Plate)	Arañazos/rayas, grietas, pliegues.
Palanquilla (Billet)	Grietas en esquinas, líneas longitudinales, arañazos.
Bobina Laminada en Caliente (Hot Rolled Coil)	Agujeros, arañazos, óxido, grietas, picaduras/costras, defectos en borde, rotura transversal bobina, cáscaras, astillas, bordes rizados, olas en bordes, golpes en bordes, patinamientos, marcas de cepillos, marcas de refractario, marcas de agua.
Bobina Laminada en Frío (Cold Rolled Coil)	Marcas de rodillos y cilindros, agujeros, arañazos, líneas, pliegues, corrosión, astillas, cascarilla, manchas de aceite, borde en sierra, arrugas, inclusiones, cáscaras, bolsas, óxido residual, golpes en bordes.
Chapa/Fleje (Sheet/Strip)	Agujeros, inclusiones, bolsas, arañazos, marcas de rodillos y cilindros.
Barra/Perfil (Bar/Beam)	Grietas, líneas, pliegues, arañazos, marcas de rodillos y cilindros, escalones, astillas.

Tabla 5.1: Tipos de defectos superficiales según el tipo de producto.

5.1 TÉCNICAS APLICADAS PARA LA DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN.

Las tablas 5.2 y 5.3 muestran un resumen de las principales técnicas aplicadas para la detección y clasificación de defectos encontradas en artículos de investigación relacionados con la inspección de productos del acero. Las técnicas de detección de defectos se aplican principalmente dentro de las etapas de preprocesamiento y segmentación de la imagen y sirven también de base, como paso previo, en etapas posteriores como son la extracción de características y la clasificación de defectos siendo esta última la etapa que categorizará los defectos en clases específicas.

Cuando lo que se pretende es exclusivamente la detección de un solo defecto, ésta no suele ser por lo general lo suficientemente robusta dando lugar a numerosos falsos positivos ante la aparición de variaciones en la reflectancia de la superficie, manchas, impurezas, otros tipos de defectos, etc. Estos falsos positivos que aparecen suelen denominarse pseudo defectos y requieren de proceso de clasificación posterior para poder realizar una correcta discriminación defecto - pseudo defecto.

De esta manera, el procedimiento general para la detección y clasificación de defectos suele seguir las siguientes etapas:

1. *Preprocesamiento*: adecuación de la imagen para la segmentación.
2. *Segmentación*: localización de los candidatos a defecto.
3. *Extracción de características* de los candidatos.
4. *Clasificación*: discriminación entre defecto y pseudo defecto (detección de defectos específicos) o clasificación de varios defectos.

Técnicas Aplicadas en Detección	
Técnica	Aplicaciones
Morfológicas	Fusión imágenes binarias: OR, AND. Realce y corrección de defectos: erosión, dilatación. Eliminación ruido: cierre, apertura, cierre top-hat.
Histograma	Estiramiento. Umbralización: Otsu, entropía Renyi, multinivel. Histograma lateral.
Transformación y Filtrado en el Dominio Espacial	Selección región de interés (R.O.I.). Substracción de imágenes. Subdivisión imagen. Correcciones geométricas lente-cámara. Eliminación ruido: filtros media, mediana y gaussiana. Suavizado con preservado de bordes: filtro bilateral. Detección de bordes: filtros primer gradiente (Sobel, Prewitt, Roberts, Kirsch, Canny). Detección de bordes: filtros segundo gradiente (Laplaciana, LoG). Seguimiento de contornos. Detección de formas: transformada de Hough. Crecimiento de regiones.
Transformación y Filtrado en el Dominio Frecuencial	Transformada discreta de Fourier (DFT). Homogeneización iluminación: filtro homomórfico. Eliminación ruido: filtro de Wiener. Análisis armónico. Transformada de Radon.
Análisis Conjunto Espacial / Espacial-Frecuencia	Filtro de Gabor. Transformadas wavelet (DWT) y no decimada (UDWT): Haar Daubechies, Bior, multiwavelet. Transformada curvelet.
Modelos Fractales	Detección de objetos caracterizados por su textura.

Tabla 5.2: Técnicas aplicadas para la detección de defectos.

Técnicas Aplicadas en Clasificación	
Tipo Clasificador	Clasificador
Clasificador Supervisado	Algoritmo K-vecinos más cercanos (K-Nearest Neighbors).
	Red neuronal retro-propagada (BP-NN).
	Máquina de vector soporte (SVM).
	Red neuronal convolucional (CNN).
	Función discriminante.
	Sistema de Inferencia de Lógica Borrosa (Fuzzy Logic).
	Árbol de Clasificación.
Clasificador No Supervisado	Mapa auto-organizado (SOM).
Clasificador Híbrido	Red neuronal de aprendizaje de cuantificación vectorial (LVQ).

Tabla 5.3: Técnicas aplicadas para la clasificación de defectos.

Las *técnicas aplicadas para la detección* pueden ser clasificadas en morfológicas, transformación y filtrado en el dominio espacial, transformación y filtrado en el dominio frecuencial, análisis conjunto espacial / espacial-frecuencia y modelos fractales. Las más utilizadas, independientemente del tipo de superficie de acero inspeccionada, son el filtrado en el dominio espacial, las operaciones morfológicas y el filtrado conjunto espacial / espacial-frecuencia.

La etapa de *preprocesamiento* suele llevarse a cabo con alguna o varias de las finalidades siguientes:

- Correcciones geométricas de la cámara [295, 296].
- Eliminación de ruido (gausiano, impulsional, frecuencial, multiplicativo). Utilización de filtros en el dominio espacial de media y mediana [297, 298], basados en la gaussiana [299, 296, 300], filtrado en el dominio de la frecuencia (paso bajo [301], filtro de Wiener [302]).
- Corrección iluminación no homogénea: substracción de fondo [303, 304, 305, 306] y filtrado homomórfico [307].
- Selección del área de análisis: subdivisión imagen [308, 309, 310, 311, 300, 312], mediante segmentación por histograma [313, 314, 315].
- Realzado basado en histogramas [316].
- Mejora de contraste y realce: filtrado en frecuencia (filtros paso alto [139], FIR [299]), filtrado con preservado de bordes [317, 318].

Extracción de Características	
Tipos	Características
Características de histograma	Media, desviación típica, asimetría, curtosis, energía y entropía. Descriptores del histograma de las orientaciones del gradiente.
Características de textura	Matriz de coocurrencia del nivel de gris (GLCM): varianza, contraste, entropía, correlación, homogeneidad, etc.
Características espaciales	Área, longitud, perímetro, diámetro, centro de gravedad, número de objetos, número de Euler, distancia relativa, orientación, compactación, signatura, longitud y relación de ejes mayores y menores, magnitud y orientación principal gradiente, patrones locales binarios (LBP).
Características frecuenciales	Transformada discreta de Fourier (DFT): descriptores de Fourier, LBP-HF.

Tabla 5.4: Características extraídas de las imágenes.

Dentro de la etapa de *segmentación* las operaciones más comunes son las siguientes:

- Detección de bordes: mediante operadores gradiente de primera [319, 302, 320, 321, 322, 299, 323, 298, 312] y segunda derivada [317, 306].
- Umbralización de histograma [320, 324, 317, 309, 325, 293, 326, 327, 328, 329, 330, 134, 300, 305, 139, 331, 332, 333, 334].
- Análisis de histograma lateral [329, 335].
- Detección de defectos mediante substracción de imágenes [303, 305].
- Crecimiento de regiones [299, 303, 304].
- Identificación de formas y geometría: transformada de Hough [296, 135] y modelos fractales [302, 139].
- Métodos basados en la transformadas wavelet: decimada [336, 293, 313, 328, 318, 322, 332, 333] y no decimada [314, 134, 335, 315]. Transformada curvelet [336].
- Filtro de Gabor [308, 309, 326, 327, 337].
- Matrices de coocurrencia del nivel de gris (GLCM) [338].
- Transformada de Radon para la búsqueda de líneas [134].
- Tratamiento de la imagen segmentada (operaciones morfológicas): eliminación de ruido y elementos no relacionados con el defecto a detectar [320, 308, 325, 295, 316, 313, 339, 134, 305, 331, 312] y combinación de imágenes segmentadas [320, 299, 332].

Previamente a la etapa de clasificación, donde se realiza el casamiento del tipo de defecto dentro del conjunto total de defectos existentes, se han de *extraer* ciertas *características* o combinaciones de éstas de los elementos o regiones de interés segmentadas para pasar a formar parte de un vector de características. La tabla 5.4 muestra un resumen de los tipos de características que han sido utilizados mayoritariamente en los artículos de investigación. La optimización del vector de características se realiza mediante análisis de componentes principales en [336, 310, 296, 340, 307] y mediante selección por algoritmos genéticos en [341, 297, 303, 334].

Finalmente, el procedimiento de *clasificación* se realiza generalmente mediante métodos de aprendizaje adaptativo tanto supervisado, donde la red se ajusta proporcionándole un gran número de entradas y salidas conocidas durante el proceso de entrenamiento cumpliendo con los requerimientos de error y convergencia de éste, como no supervisado, donde la red se ajusta por sí misma modificando las relaciones entre sus entradas y salidas [291]. Independientemente de la técnica empleada, el objetivo principal siempre será el mismo: obtener una clasificación de defectos correcta y robusta con el menor coste computacional.

Las técnicas de clasificación de defectos empleadas en la inspección de superficies de acero son variadas (tabla 5.3) aunque, como puede verse a continuación, las más utilizadas son las redes neuronales con retropropagación (NN-BP) y las máquinas de vectores de soporte (SVM) seguidas de los árboles de clasificación:

- Clasificadores supervisados:
 - Algoritmo K-vecinos más cercanos (K-Nearest Neighbors): [319, 295, 342]
 - Red neuronal retro-propagada (BP-NN): [338, 321, 310, 337, 341, 343, 299, 344, 339, 345, 303, 304, 305, 139, 342]
 - Máquina de vector soporte (SVM): [346, 324, 309, 325, 293, 326, 328, 321, 310, 314, 340, 303, 304, 312, 342, 307]
 - Red neuronal convolucional (CNN): [347]
 - Función discriminante: [336, 348, 318, 322, 301]
 - Sistema de Inferencia de Lógica Borrosa (Fuzzy Logic): [302, 320, 305, 307]
 - Árbol de Clasificación: [308, 313, 341, 322, 299, 135, 323, 330, 134, 298]
- Clasificadores no supervisados:
 - Mapa auto-organizado (SOM): [338, 296]
- Clasificadores híbridos:
 - Red neuronal de aprendizaje de cuantificación vectorial (LVQ): [297, 304]

5.1.1 Conclusiones.

Son varias las conclusiones que se pueden obtener tras analizar las técnicas de detección y clasificación de defectos en superficies de acero:

1. Es complejo realizar una detección y clasificación de defectos en líneas de producción de acero. El ambiente hostil en el que tiene que operar el sistema de inspección (elevadas temperaturas, vibraciones, atmósferas corrosivas, suciedad, etc.) y la variabilidad de los defectos que pueden aparecer sobre la superficie del acero ocasionan gran cantidad de ruido en las imágenes adquiridas que han de procesarse.
2. Las técnicas empleadas para la detección de defectos son variadas y suelen utilizarse de forma combinada siguiendo por lo general la misma secuencia:
 - a) Etapa de preprocesamiento para la selección del área de interés, eliminación de ruido y realce de los defectos que se desean detectar.
 - b) Etapa de segmentación de los defectos mediante técnicas de segmentación convencionales (detección de bordes basados de primera y segunda derivada, umbralización de histograma, crecimiento de regiones, transformadas wavelet decimadas y no decimadas, análisis en el dominio de la frecuencia DFT, etc.).
 - c) Etapa de refinamiento con imágenes binarias (operaciones morfológicas): combinación de imágenes binarias y eliminación de ruido.
 - d) Finalmente un etiquetado de los defectos encontrados.
3. La selección de los elementos del vector de características extraídos de los defectos detectados y su optimización es fundamental para la clasificación.
4. Respecto a las técnicas de clasificación, se emplean mayoritariamente clasificadores basados en redes neuronales retro-propagadas (BP-NN) y máquinas de vectores soporte (SVM).
5. Con el rápido avance en la capacidad computacional de los procesadores resulta difícil decidir si un sistema de inspección es adecuado para el tiempo real o no (aquellas tareas de inspección que hasta hace un par de años no se podían ejecutar en tiempo real a día de hoy si son posibles).
6. Los autores de los artículos indican niveles de precisión en detección y clasificación de entre el 68 % y el 98 % para poblaciones de muestras muy dispares lo que hace que sea complejo seleccionar como más apropiado un método u otro para la detección y clasificación de defectos.

5.2 EVALUACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE DEFECTOS.

A pesar de la dificultad que en ocasiones puede conllevar la evaluación de algoritmos aplicados en detección y clasificación de defectos de un sistema de inspección resulta necesario obtener un indicador que muestre, de la manera más objetiva posible, el rendimiento de éstos y permita utilizarlo como medida comparativa con otros sistemas.

El tipo más usado para la evaluación del rendimiento de un algoritmo de segmentación es la *evaluación subjetiva* donde los resultados de la segmentación son juzgados por un operador humano. Evidentemente, la desventaja está en los mismos operadores humanos que pueden introducir cierto grado de subjetividad durante la evaluación visual o cualitativa de los resultados de la segmentación. Por otro lado, esta forma de evaluación resulta ser un proceso bastante tedioso que requiere bastante tiempo ya que es necesario analizar un número de casos lo suficientemente grande como para obtener una evaluación fiable.

Los métodos de *evaluación objetiva* pueden clasificarse en analíticos y empíricos [141]. Los *métodos analíticos* tratan los algoritmos directamente examinando el principio sobre el que están fundamentados mientras que los *empíricos* juzgan los resultados de acuerdo a unos criterios predefinidos (métodos empíricos de bondad) o comparándolos con una imagen de referencia (métodos empíricos de discrepancia). A pesar de lo que pueda parecer en principio, los métodos empíricos son en la práctica más efectivos y útiles que los analíticos siendo los más utilizados.

Finalmente, los métodos de evaluación objetiva empírica pueden ser clasificados en dos: supervisados y no supervisados. Los *supervisados*, también llamados métodos empíricos de discrepancia, se basan en la comparación de la imagen segmentada con una imagen segmentada manualmente. De nuevo, un operador humano introducirá cierto grado de subjetividad al tener que realizar manualmente la segmentación. Ejemplos de estos tipos de métodos de evaluación son el error de clasificación y el error de área relativa de objeto. Los métodos *no supervisados*, también llamados métodos empíricos de bondad, no requieren una imagen de referencia por lo que evalúan la segmentación en base a unos índices extraídos de la imagen. El método de no uniformidad de la región pertenece a este tipo de métodos.

5.2.1 Criterios de evaluación objetivos del rendimiento de algoritmos.

Los criterios en los que están basados los métodos empíricos pueden ser clasificados en cuatro grupos:

1. Contabilizan el número de píxeles mal clasificados.
2. Tienen en cuenta su posición.
3. Contabilizan el número de defectos en la imagen.
4. Analizan las características de los defectos detectados en la imagen.

Según sea el punto de vista desde el que se analice el rendimiento de los algoritmos, éstos podrían ser evaluados mediante los tres primeros criterios (evaluación según la calidad de la inspección visual) o mediante el cuarto criterio (evaluación según calidad de la imagen segmentada).

Partiendo de estas ideas, algunos autores han desarrollado una serie de métodos para la evaluación del rendimiento de algoritmos de segmentación.

Error de clasificación (Misclassification Error, ME [349]).

Índice de error para un algoritmo de segmentación de una imagen compuesto por dos elementos: fondo y objeto segmentado (ecuación 5.1). Refleja el porcentaje de píxeles del fondo de la imagen asignados equivocadamente al objeto segmentado. La segmentación se habrá realizado de forma completamente correcta cuando $ME = 0$ (coinciden el fondo y el objeto en la realidad y en el algoritmo de segmentación: $F_R = F_A$ y $O_R = O_A$).

$$ME = 1 - \frac{|F_R \cap F_A| + |O_R \cap O_A|}{|F_R| + |O_R|} \quad (5.1)$$

donde F_R y O_R son los píxeles que se corresponden en la realidad con el fondo y el objeto y F_A y O_A los píxeles que se corresponden con el fondo y el objeto tras aplicar el algoritmo de segmentación.

No uniformidad de la región (Region Non Uniformity, NU [350]).

Este índice, NU (ecuación 5.2), muestra la bondad de la segmentación de los objetos de una imagen utilizando para ello el número de píxeles que se corresponden con el objeto O_A y con el fondo F_A tras la segmentación, la varianza de la imagen σ^2 y la varianza del fondo σ_F^2 . Una imagen correctamente segmentada tendrá un valor $NU \approx 0$.

$$NU = \frac{|O_A|}{|O_A + F_A|} \cdot \frac{\sigma_F^2}{\sigma^2} \quad (5.2)$$

Error de área relativa del objeto (Relative Foreground Area Error, RAE [351]).

En este caso, el índice RAE (ecuación 5.3) se calcula comparando el área de los objetos en la imagen de referencia A_R con el área en la imagen segmentada por el algoritmo A_A y va a reflejar la precisión en la medida de la característica extraída. Una imagen estará bien segmentada cuando $RAE \approx 0$.

$$RAE = \begin{cases} \frac{A_R - A_A}{A_R} & A_A < A_R \\ \frac{A_A - A_R}{A_A} & A_A \geq A_R \end{cases} \quad (5.3)$$

Sensibilidad y especificidad ([185]).

Si se considera la detección de defectos como un proceso de decisión o clasificación los píxeles pueden pertenecer a dos clases distintas (figura 5.1), aquellos píxeles que representan el defecto, en nuestro caso óxido residual, se considerarían pertenecientes a la *clase anormal* (o positivos) y los libres de defecto, o superficie libre de óxido residual, a la *clase normal* (o negativos).

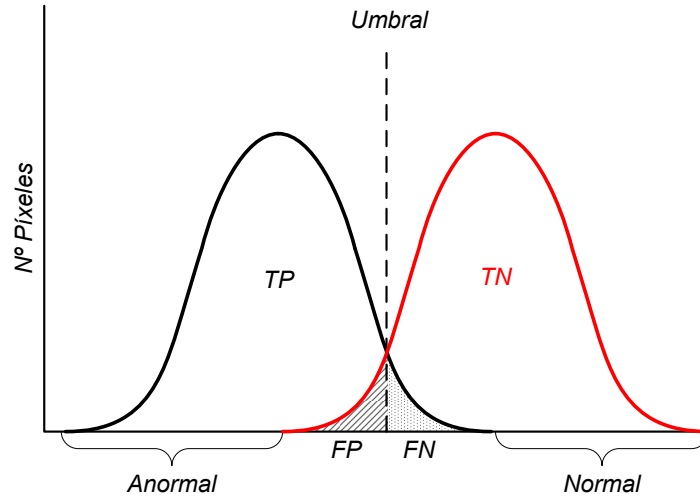


Figura 5.1: Clases anormales (defecto) y normales (sin defecto).

De esta manera, una detección correcta de la condición anormal se denomina *verdadero positivo* (TP), y una detección correcta de la condición normal *verdadero negativo* (TN). En el caso de un error de clasificación podría darse de dos formas: píxeles normales clasificados como anormales o *falso positivo* (FP) y píxeles anormales clasificados como normales o *falso negativo* (FN). Habiendo realizado estas definiciones, se llega a uno de los métodos de cuantificación de errores de clasificación más conocidos: medidas de *sensibilidad* (S) y *especificidad* (E) .

$$S = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{TP}{T_{\text{Anormal}}} \quad (5.4)$$

$$E = \frac{TN}{TN + FP} = \frac{TN}{T_{\text{Normal}}} \quad (5.5)$$

Tanto la sensibilidad como la especificidad varían entre 0 y 1 y el detector/clasificador se considera perfecto cuando tanto la sensibilidad como la especificidad son iguales a 1.

Particularizando ambos conceptos a la detección de óxido residual, la *sensibilidad* indica la proporción de óxido residual correctamente identificado, es decir, el tanto por ciento de acierto en la detección de óxido residual cuando realmente existe. La *especificidad* indica la proporción de acero inoxidable libre de óxido residual correctamente identificado o el tanto por ciento de acierto en la detección de superficie libre de óxido cuando realmente la superficie no contiene óxido residual.

Análisis mediante curva ROC (Receiver Operating Characteristics[185]).

El objetivo principal del análisis mediante la curva ROC es la evaluación de la calidad de un detector/clasificador de forma cuantitativa determinando el umbral de discriminación óptimo para la clasificación.

AUC	Calidad Detector
[0,5, 0,6)	Malo
[0,6, 0,75)	Regular
[0,75, 0,9)	Bueno
[0,9, 0,97)	Muy Bueno
[0,97, 1)	Excelente

Tabla 5.5: Evaluación de la calidad del detector mediante el índice *AUC*.

La curva ROC (figura 5.2) se construye a partir de los valores de los parámetros de sensibilidad y especificidad que se obtienen al variar el umbral de discriminación o frontera de decisión. Es muy común representar gráficamente la sensibilidad, S , en el eje vertical y el valor de $(1 - E)$ en el eje horizontal. Un buen detector será aquel cuya curva ROC se aproxime a la esquina superior izquierda. Uno de los parámetros que se obtienen de la curva ROC como índice de la bondad del detector es el área que encierra la curva respecto a su diagonal positiva (*AUC*, Area Under Curve). La tabla 5.5 muestra la bondad del detector basada en el índice *AUC*.

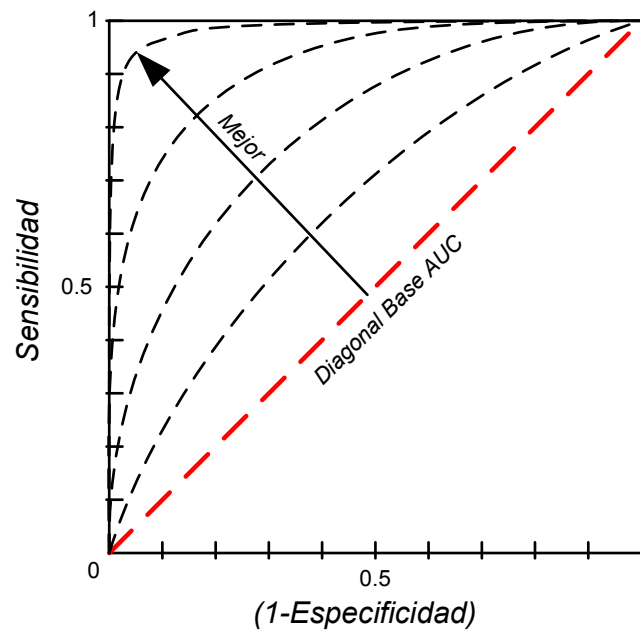


Figura 5.2: Curva ROC.

Otros indicadores ([352]).

En [352] se definen tres nuevos índices de evaluación del rendimiento de un algoritmo de detección a partir de combinaciones de la sensibilidad S y especificidad E : el índice de Youden (γ), verosimilitud positiva y negativa (ρ_+ y ρ_-) y energía discriminante (DP).

$$\gamma = S - (1 - E) \quad (5.6)$$

$$\rho_+ = \frac{S}{(1 - E)} \quad (5.7)$$

$$\rho_- = \frac{1 - S}{(1 - E)} \quad (5.8)$$

$$DP = \frac{\sqrt{3}}{\pi \left[\log \left(\frac{S}{(1-S)} \right) + \log \left(\frac{E}{(1-E)} \right) \right]} \quad (5.9)$$

El índice γ evalúa el rendimiento del detector de una manera más fina respecto a las dos clases. Un valor elevado de ρ_+ indica un mejor rendimiento sobre la clase anormal mientras que un valor elevado de ρ_- indica un mejor rendimiento sobre la clase normal. El índice DP evalúa la capacidad de discriminación entre las dos clases (anormal y normal):

- $DP < 1$: rendimiento pobre.
- $1 \leq DP < 2$: rendimiento limitado.
- $2 \leq DP < 3$: rendimiento aceptable.
- $DP \geq 3$: rendimiento bueno.

CARACTERÍSTICAS DEL ÓXIDO RESIDUAL

6.1 OXIDACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE.

La principal característica del acero inoxidable es su alta resistencia a la oxidación debido a la formación de una delgada película protectora sobre la superficie del material denominada *película pasiva* formada por la reacción entre el agua y el metal base y compuesta por un oxihidróxido de cromo y hierro. Los aceros inoxidables conservarán esta película pasiva en numerosos medios oxidantes lo que explica la alta resistencia a la corrosión de estos materiales y la gran cantidad de usos que se le pueden dar.

Durante el proceso de fabricación del acero¹ se aplican una serie de tratamientos térmicos que provocan cambios físicos y químicos en el material que, en caso de realizarse bajo atmósferas no inertes con cierto contenido de oxígeno, oxidarán el acero formando una capa de óxido sobre su superficie [10].

Uno de los tratamientos más importantes aplicados al acero tras su laminación en caliente o en frío es el de recocido². Con este tratamiento se homogeneiza el material y se alivian las tensiones internas originadas en el material tras el proceso de laminación mediante la regeneración de su estructura cristalina y la disolución de los carburos presentes en el material [10]. Básicamente, el proceso de recocido consiste en un calentamiento del metal por encima de una determinada temperatura seguido de un enfriamiento lento. Mediante el tratamiento de recocido el acero alcanzará el grado de ductilidad adecuado para poder ser conformado más fácilmente en etapas y procesos posteriores [353].

6.1.1 La capa de óxido.

Cuando el acero inoxidable es calentado a alta temperatura, como por ejemplo en hornos de precalentamiento y recocido se va a formar una capa de óxido debido a la reacción producida entre la superficie del acero y el oxígeno contenido en las moléculas de O_2 , H_2O y CO_2 que se encuentran presentes en el aire y en los combustibles fósiles de combustión del horno [11]. La composición química de la capa de óxido será función de la propia composición química del acero inoxidable y de las características del proceso de recocido (tipos y condiciones estequiométricas de la atmósfera, temperaturas, temporización del proceso calentamiento y enfriamiento, etc.). Dado el gran número de variables a controlar en el tratamiento de recocido y la gran variedad de tipos de aceros la composición química de la capa de óxido es muy variada.

1 En el apéndice A se muestra un resumen del proceso completo de fabricación de productos de acero inoxidable.

2 Denominado *annealing* en inglés. En la sección A.4.1 del apéndice A se desarrollan los tratamientos de recocido aplicados a los aceros según su tipo (austenítico, ferrítico y martensítico).

Los óxidos más importantes que pueden formar parte de esta capa son Cr_2O_3 , FeCr_2O_4 , FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , SiO_2 , MnO y NiO . De todos ellos, los que suelen encontrarse en mayor cantidad son los óxidos de hierro quedando dispuestos en la capa de la siguiente manera [354, 355]:

- *Hematita* (Fe_2O_3): contiene un 30,1 % de oxígeno y está ubicada en la zona más externa de la capa de óxido.
- *Magnetita* (Fe_3O_4): ubicada en la zona intermedia contiene un 27,6 % de oxígeno.
- *Wustita* (FeO): con un contenido del 22,3 % en oxígeno se encuentra en la zona más interna y cercana al metal base.

Se han realizado numerosos estudios experimentales cuyo objetivo es determinar la composición química y el tamaño de la capa de óxido formada en un determinado tipo de acero inoxidable tras someterlo a un proceso de recocido en una atmósfera controlada [356, 11, 355, 357, 358, 359, 360].

Extraído del estudio realizado en [358], la figura 6.1 muestra dos imágenes tomadas por un microscopio electrónico de transmisión (*TEM*, Transmission Electron Microscopy) de un acero inoxidable austenítico tipo 316 que ha sido sometido a recocido bajo distintas atmósferas.

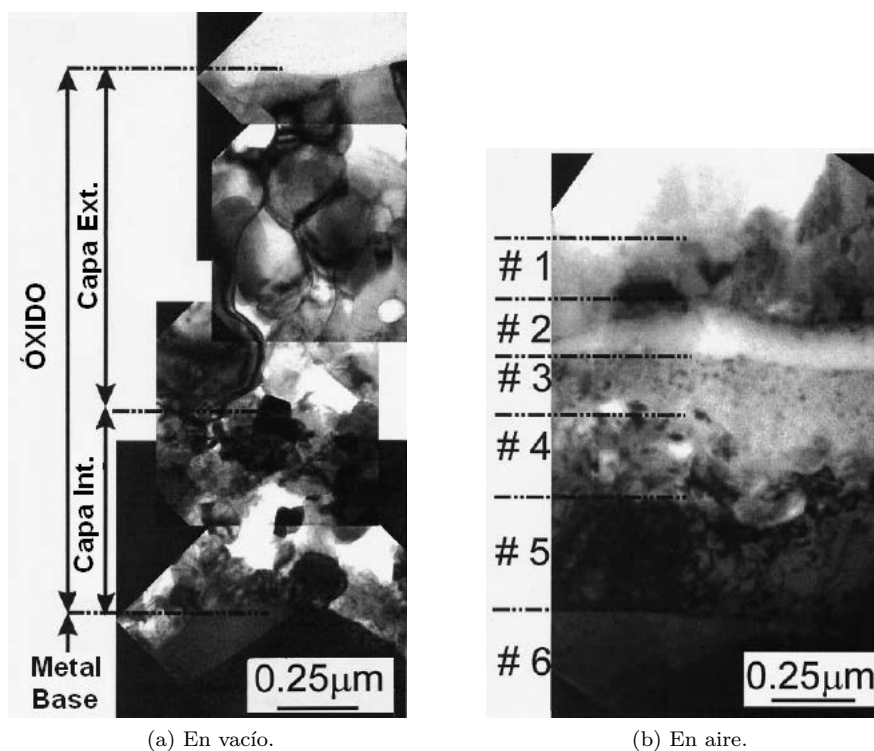


Figura 6.1: Corte transversal de la capa de óxido.

En la figura 6.1a se muestra la imagen de una sección del acero tras haber sido recocido en vacío. En ella se puede observar que la capa de óxido está formada de una material policristalino perfectamente denso y compuesta, a su vez, de dos capas internas cuya composición química indica que son óxidos (ver tabla 6.1a). La capa más externa está compuesta de óxido de hierro, fundamentalmente Fe_2O_3 , y la más interna de óxido de cromo.

La figura 6.1b muestra el mismo tipo de acero pero recocido en una atmósfera compuesta por aire. En este caso, la composición de la capa de óxido es más compleja y está formada por seis subcapas (las composiciones químicas de cada una de las seis capas se muestran en la tabla 6.1b). Las cuatro subcapas más externas tienen un contenido decreciente de oxígeno desde la más externa a la más interna y pueden considerarse como óxidos. La primera será una capa de óxido de hierro y la cuarta una capa de óxido de cromo. Debido a la complejidad de esta estructura de la capa la adhesión al sustrato metálico será pequeña.

Capa	[O] %	[Fe] %	[Cr] %	[Ni] %	[Mo] %	[Mn] %	[Si] %
Externa	66,7	26,2	6,7	0,4	-	-	-
Interna	61,5	8,0	27,5	0,8	0,8	-	1,4

(a) En vacío.

Capa	[O] %	[Fe] %	[Cr] %	[Ni] %	[Mo] %	[Mn] %	[Si] %
1	42,9	40,5	3,24	4,2	9,16	-	-
2	-	61,2	22,9	12,4	3,5	-	-
3	-	49,6	40,5	6,2	3,6	-	-
4	45,1	16,6	28,3	7,6	2,4	-	-
5	-	46,4	9,9	43,3	0,5	-	-
6	-	68,4	15,8	15,0	0,8	-	-

(b) En aire.

Tabla 6.1: Composición química (acero inoxidable austenítico 316).

6.2 MECANISMO DE ELIMINACIÓN DE LA CAPA DE ÓXIDO.

La capa de óxido creada sobre la superficie del acero inoxidable durante los procesos de tratamiento térmico ha de ser eliminada completamente antes de continuar con el proceso de producción. Como se ha visto con anterioridad, una eliminación de óxido incompleta puede originar una serie de problemas en procesos posteriores ³. La eliminación de la capa de óxido será más fácil en aquellas capas con mayor porosidad y menor adhesión al sustrato: capas compuestas por granos de mayor tamaño y con fronteras de grano irregulares [355].

Las técnicas de eliminación del óxido superficial se clasifican según el tipo de actuación: técnicas de decapado mecánicas y técnicas de decapado químicas [361].

Dentro de las técnicas de *decapado mecánicas* cabe destacar el granallado con arena de sílice (*Sandblasting*) cuando se requiere una eliminación rápida de capas de óxido fuertemente adheridas, el granallado con pequeñas partículas de acero al carbono o hierro (*Shotblasting*) y el granallado húmedo (*Wetblasting*) donde varias clases de sustancias abrasivas son diluidas en determinados compuestos líquidos para ser proyectadas mediante aire a presión sobre la superficie del acero [362]. Esta última técnica se usa cuando la eliminación del óxido superficial se quiere controlar de forma exhaustiva. Así, mediante la selección de las sustancias abrasivas que van a ir disueltas en el líquido y el control de la fuerza de impacto del fluido proyectado sobre la superficie del acero se realizará un control óptimo de la eliminación del óxido. El resto de partículas de óxido que puedan quedar sueltas sobre la superficie del metal se pueden retirar mediante un cepillado (*brushed*).

Estas técnicas de decapado mecánico forman parte de lo que se conoce como *descascarillado* (*descaling*) cuyo objetivo fundamental es la eliminación de la capa gruesa de óxido visible de la superficie del acero.

Los tratamientos mecánicos de eliminación del óxido pueden considerarse como tratamientos previos ya que la eliminación completa del óxido va a llevarse a cabo mediante el tratamiento de *decapado químico*.

El término decapado ácido (*pickling*) hace referencia a la eliminación química del óxido superficial por la inmersión del acero en una solución ácida acuosa. Es el proceso más conocido y habitual utilizado para la eliminación del óxido superficial y está basado en la reacción química que se produce entre el ácido y los distintos tipos de óxidos. El objetivo del decapado no solamente es la eliminación completa del óxido superficial sino que también pretende eliminar la capa más externa del metal base cuya concentración, baja en cromo, originaría una capa pasiva poco eficiente frente a la corrosión.

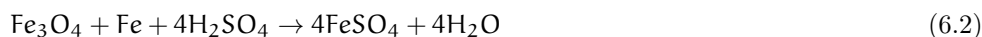
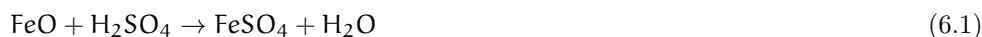
Debido a la variabilidad en la naturaleza y composición química de los óxidos superficiales no existe un ácido o proceso general que elimine de forma universal los óxidos. La dificultad en la eliminación del óxido superficial va a depender de la composición química de los óxidos, así como, de los tratamientos térmicos que haya sufrido el acero previamente.

Cuando el acero es sometido a gases calientes que contienen oxígeno se formarán varias capas de óxido superficial con óxidos ricos en oxígeno en sus capas más externas y con óxidos ricos en metal en las más internas. Las capas más externas son bastante solubles en la mayoría de los ácidos que se usan para decapado pero las capas internas requerirán el uso de ácidos más agresivos. Por esta razón, el decapado químico, algunas veces, va precedido por un baño de sal alcalino.

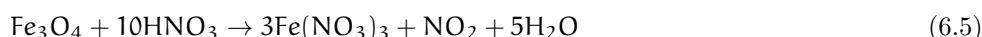
³ Ver sección 1.1 en capítulo 1.

Los ácidos más comunes que suelen emplearse para el decapado del acero inoxidable son el *ácido sulfúrico* (H_2SO_4), el *ácido nítrico* (HNO_3) y el *ácido fluorhídrico* (HF).

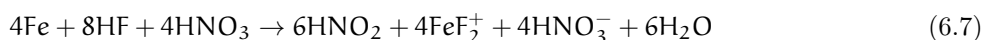
El H_2SO_4 reaccionará con los óxidos principales (FeO y Fe_3O_4) y con el metal base (Fe) según las ecuaciones siguientes (6.1, 6.2 y 6.3) [354]:



El HNO_3 reaccionará según (6.4, 6.5 y 6.6):



En procesos mixtos de decapado-pasivado suele usarse una disolución ácida compuesta por HNO_3 y HF de manera que el ácido fluorhídrico actúa como agente de decapado y el ácido nítrico como agente de pasivado. La ecuación resulta ser bastante compleja aunque, básicamente, puede expresarse como:



En muchas ocasiones, previamente al procedimiento de decapado, suelen emplearse soluciones alcalinas basadas en sales fundidas como el *hidróxido de sodio* (NaOH), el *nitrato sódico* (NaNO_3) y el *cloruro de sodio* (NaCl) para aumentar la porosidad y solubilidad de la capa de óxido y decrementar su adherencia de manera que se acelere el proceso de decapado posterior [363]. Las ventajas que se obtienen con el uso de estas soluciones salinas son varias:

- Limpian la superficie del acero evitando que ciertas partículas de suciedad puedan reaccionar con las soluciones ácidas del decapado.
- Actúa exclusivamente sobre la capa de óxido sin daño o pérdida del metal base.

- El ataque químico que se produce sobre los carburos es homogéneo.
- En capas de óxido de pequeño espesor en las que se desea evitar el tratamiento de granallado.

6.2.1 Líneas de recocido y decapado continuo.

Las líneas de recocido y decapado continuo⁴ (ver figura 6.2) son líneas que procesan secuencialmente y de forma continua bobinas de distintos tipos de acero y dimensiones. Esta continuidad se consigue aplicando dos procedimientos o técnicas. El primero consiste en unir cada final (o cola) de una bobina con el principio (o cabeza) de la siguiente en una estación de soldeo dispuesta en la sección de entrada de la línea. El segundo, mediante un sistema de bucles acumuladores con los que se consiguen que la bobina mantenga ininterrumpidamente una velocidad constante a lo largo de las secciones de recocido y decapado.

Estos bucles se encuentran ubicados a la entrada del horno de recocido y a la salida de la sección de decapado y permiten que distintos tipos de aceros de características dimensionales diferentes puedan ser recocidos y decapados de forma específica (temperaturas de recocido, tiempos de permanencia en horno y tanques de decapado, etc.). Las bobinas que se procesan en estas líneas continuas pueden venir de laminación en caliente o de laminación en frío.

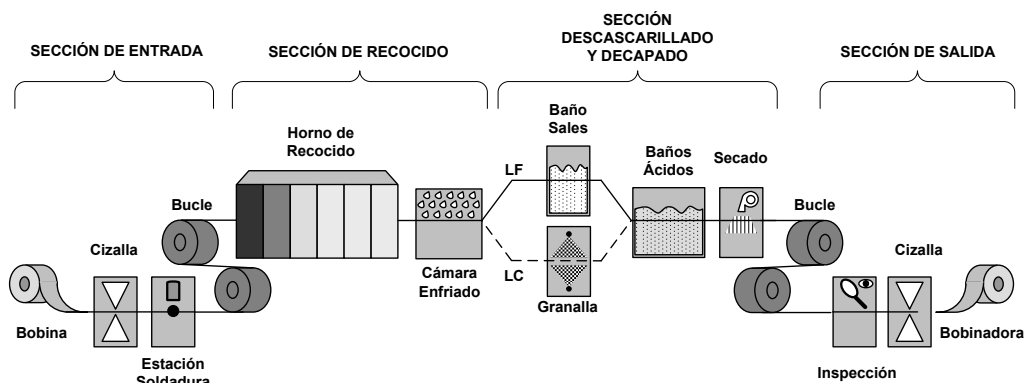
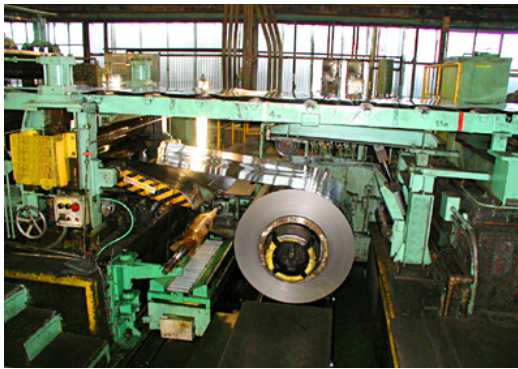


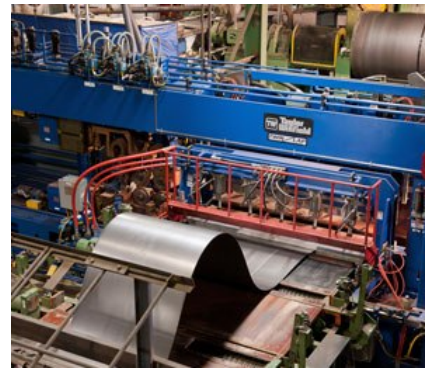
Figura 6.2: Línea de recocido y decapado continuo.

El procesamiento de una bobina en una línea de recocido y decapado continuo se inicia en la desbobinadora de la sección de entrada (figura 6.3a) la cual irá desenrollando paulatinamente la bobina. Previamente a la unión de la bobina con su predecesora mediante soldadura (figura 6.3b), la cabeza y la cola son saneadas por una cizalla eliminando aquellas partes que no van a ser procesadas y preparando las superficies que van a ser soldadas. A continuación, la banda pasa por un bucle acumulador antes de entrar en la sección de recocido.

4 APL: Annealing and Pickling Line.



(a) Desbobinadora.



(b) Preparación y unión de bobinas.

Figura 6.3: Sección de entrada.



Figura 6.4: Horno de recocido continuo.



(a) Granalladora.



(b) Tanques de decapado.

Figura 6.5: Descascarillado y decapado.

El horno de recocido (figura 6.4) está dividido interiormente en una serie de zonas cada una de las cuales se encuentra a una temperatura constante y específica. La velocidad a la que pasa la banda por las secciones de recocido y decapado es función del tipo de acero, el ancho y el espesor (esta velocidad es constante y está normalizada).

A la salida del horno de recocido, la banda pasa por una cámara donde es enfriada de manera controlada (*quenching*) bien mediante soplado de aire y agua (para espesores de banda pequeños), o bien, con agua (espesores grandes). Seguidamente la banda entra en la sección de descascarillado y decapado.

La capa de óxido que se ha formado tras el recocido de bobinas que vienen de laminación en caliente suele ser más irregular, de mayor espesor y más difícil de eliminar que la que se forma en bobinas que ya han sido laminadas en frío previamente. Una práctica bastante común en la industria y que facilita el decapado posterior es el descascarillado. Este procedimiento constará de dos fases:

- Generación de grietas y fisuras en la capa de óxido curvando la banda de acero. Ésto se realiza por medio de rodillos estratégicamente ubicados en la línea.
- Retirar el óxido suelto de la superficie de la banda mediante un suave granallado metálico (figura 6.5a) seguido de un cepillado. En este caso, el rendimiento dependerá de la velocidad de la línea, el tipo de granallado y la densidad, energía y geometría de la granalla. En el caso de aceros laminados en frío, cuya capa de óxido es de menor espesor y adherencia, el granallado metálico suele sustituirse por un baño en una solución alcalina.

Orden	Operación
1	Disolución de H_2SO_4 al 5 %, $T^a \approx [50, 60]^\circ\text{C}$.
2	Enjuague con agua.
3	Disolución de HNO_3 al 5 %, $T^a \approx [50, 60]^\circ\text{C}$.
4	Enjuague con agua.
5	Disolución de HNO_3 al 10 % y HF al 5 %, $T^a \approx 60^\circ\text{C}$.
6	Enjuague con agua.
7	Secado.

(a) Laminación en caliente.

Orden	Operación
1	Disolución sales fundidas (NaOH , NO_3Na y NaCl), $T^a \approx 480^\circ\text{C}$.
2	Enjuague con vapor de agua.
3	Disolución de H_2SO_4 al 5 %, $T^a \approx [30, 40]^\circ\text{C}$.
4	Enjuague con agua.
5	Disolución de HNO_3 al 5 %, $T^a \approx [50, 60]^\circ\text{C}$.
6	Enjuague con agua.
7	Disolución de HNO_3 al 10 % y HF al 3 %, $T^a \approx 60^\circ\text{C}$.
8	Enjuague con agua.
9	Secado.

(b) Laminación en frío.

Tabla 6.2: Secuencia de decapado.

Generalmente, se usa más de un método para eliminar el óxido superficial de la banda de acero. Por ejemplo, para bobinas que ya han sido laminadas en frío (*LF* figura 6.2) se usa la inmersión en baño de sal seguido del decapado ácido. Por el contrario, para bobinas que vienen directamente de una laminación en caliente (*LC* figura 6.2) se aplicarán métodos de descascarillado, como puede ser el granallado, seguidos del decapado ácido.

El tiempo que se necesita para realizar el decapado variará entre varios minutos o menos dependiendo de la capacidad de la línea y del tipo o grado de acero que se esté procesando. Siempre que sea posible la producción no debe estar limitada por el tiempo necesario para el decapado por lo que, al final, hay que establecer un compromiso entre la cantidad de óxido a eliminar y la pérdida mínima de producción.

Las disoluciones ácidas que se usan para el decapado incluyen el ácido sulfúrico, mezclas de ácido sulfúrico y fluorhídrico, mezclas de ácido nítrico y fluorhídrico y ácido nítrico. Cada disolución se almacena en un tanque especial sobre el que se hace pasar la banda (figura 6.5b). Un esquema típico de decapado podría estar compuesto de un decapado previo realizado con una disolución de ácido sulfúrico seguido de un ataque con una disolución mezcla de ácido fluorhídrico y nítrico (el decapado más agresivo) para terminar con una disolución de ácido nítrico. Las tablas 6.2a y 6.2b muestran secuencias de decapado para aceros austeníticos, ferríticos y martensíticos provenientes de laminación en caliente y de laminación en frío respectivamente.

Finalmente, las funciones que se realizan en la sección de salida son la inspección de la banda, donde el inspector controla la calidad superficial de la bobina buscando posibles defectos superficiales y realiza la toma de medidas de ancho (figura 6.6a) y espesor (figura 6.6b) para su verificación, el aplanado de la superficie, el corte por cizalla y el rebobinado de la banda.



(a) Verificación ancho.



(b) Verificación espesor.

Figura 6.6: Inspección final.

6.2.2 *El óxido residual.*

En condiciones normales, una vez finalizado el proceso de recocido y decapado continuo, la superficie de la banda de acero está completamente limpia y no queda rastro alguno de óxido. Si no hay ninguna otra clase de defecto que haya sido detectado, el proceso de fabricación puede terminar aquí o continuar, bien en laminación en frío, bien en otras líneas de acabado y corte.

Si el decapado no ha sido completo debido, por ejemplo, a un exceso de velocidad de la línea, problemas en el granallado, concentración o temperatura inadecuada de las disoluciones de los tanques de decapado, variación de la composición química del óxido, etc., cierta cantidad de óxido puede quedar distribuida de forma aleatoria sobre la superficie de la banda, concretamente en algunos de los valles que forman parte de la rugosidad de la superficie.

En caso de que el óxido superficial forme pequeñas manchas de tamaño comprendido entre las 50 y 200 μm (o micras) se denominará *óxido residual* [11] o, en el argot utilizado en la fabricación del acero inoxidable, *cascarilla residual* (ver figura 1.1b).

6.3 ESTUDIO ESPECTROFOTOMÉTRICO.

Dado que el objetivo principal de la tesis es la implementación de una arquitectura de adquisición y procesamiento de imagen para la detección de óxido residual mediante visión por computador, en la cual entra a formar parte el proceso de adquisición usando dispositivos convencionales (cámara, óptica, sistema de iluminación, etc.), es fundamental conocer las características de reflexión de la superficie del acero y del óxido residual.

En la presente sección se resumen los resultados experimentales obtenidos tras someter una serie de muestras de acero inoxidable con distintos acabados superficiales, con y sin óxido residual, a varios experimentos y pruebas encaminadas al estudio de la reflectancia superficial de las muestras. El objetivo final de estas pruebas es la búsqueda de rangos de longitudes de onda del espectro en los que sea posible maximizar el contraste entre la superficie del acero inoxidable y el óxido residual.

Los experimentos realizados sobre las muestras han sido realizados por el *Instituto de Automática Industrial* (IAI) del *Centro Superior de Investigaciones Científicas* (CSIC) en Madrid y se encuentran recogidos en [364]. Un resumen de este estudio puede encontrarse en [20].

El estudio de reflectancia está basado en el análisis de las propiedades de emisión, absorción y reflexión de la superficie de las muestras. El instrumento utilizado para realizar este estudio es el *espectrofotómetro* que permite medir la cantidad proporcional de onda electromagnética reflejada por una superficie (flujo luminoso reflejado Φ_r) cuando se hace incidir sobre ésta una onda electromagnética conocida (flujo luminoso incidente Φ_i) generada por una fuente de radiación luminosa. El resultado que se obtiene es una curva espectral que muestra el espectro de reflectancia ρ_λ de la superficie como función de la longitud de onda λ .

$$\rho_\lambda = \frac{[\Phi_r]_\lambda}{[\Phi_i]_\lambda} \quad (6.8)$$

Aunque puedan parecer lo mismo la CIE⁵, en su publicación *International Lighting Vocabulary*, define de la siguiente forma los términos reflectancia y reflectividad:

REFLECTANCIA (ρ): Considerando una radiación incidente de una determinada composición espectral, polarización y distribución espacial, la reflectancia es la relación entre el flujo luminoso o radiante reflejado y el flujo luminoso o radiante incidente en unas condiciones dadas.

REFLECTIVIDAD (ρ_∞): Reflectancia de una capa de material de tal espesor que no hay cambio en la reflectancia con el incremento del espesor (el signo infinito indica que el flujo reflejado por la superficie no contiene ninguna contribución del flujo reflejado por otra interfase).

En [29] se indica la importancia de estudiar la reflexión del material mediante el uso de un espectrógrafo como método para encontrar regiones del espectro que pudieran originar un efecto dominante en el contraste de los defectos. El análisis espectrofotométrico para la obtención de valores de reflectancia también ha sido llevado a cabo en otros estudios e investigaciones [365, 366, 367, 368].

⁵ International Lighting Commission.

En el apéndice B (sección B.6) se describen los tipos de superficies existentes según el modo de reflexión de un haz incidente, las relaciones entre sus magnitudes radiométricas y las características de la reflectancia según el tipo de superficie.

6.3.1 *Curvas espectrales.*

Las curvas espectrales están realizadas para rangos de longitudes de onda que van desde, aproximadamente, los 200 y 2400 nm abarcando las bandas del espectro electromagnético del ultravioleta cercano o *NUV* (200-380 nm), visible (380-780 nm) e infrarrojo cercano o *NIR* (780-2400 nm).

Las curvas mostradas son de varios tipos:

- Curvas espectrales con las reflectancias obtenidas en cada una de las seis muestras.
- Curva espectral con la distribución de la reflectancia sobre bandas espectrales conocidas.
- Curvas espectrales calculadas del promedio de las reflectancias de las muestras y las desviaciones estándar.
- Curva espectral calculada de la diferencia entre la reflectancia promedio en el acero inoxidable y la reflectancia promedio en el óxido residual.

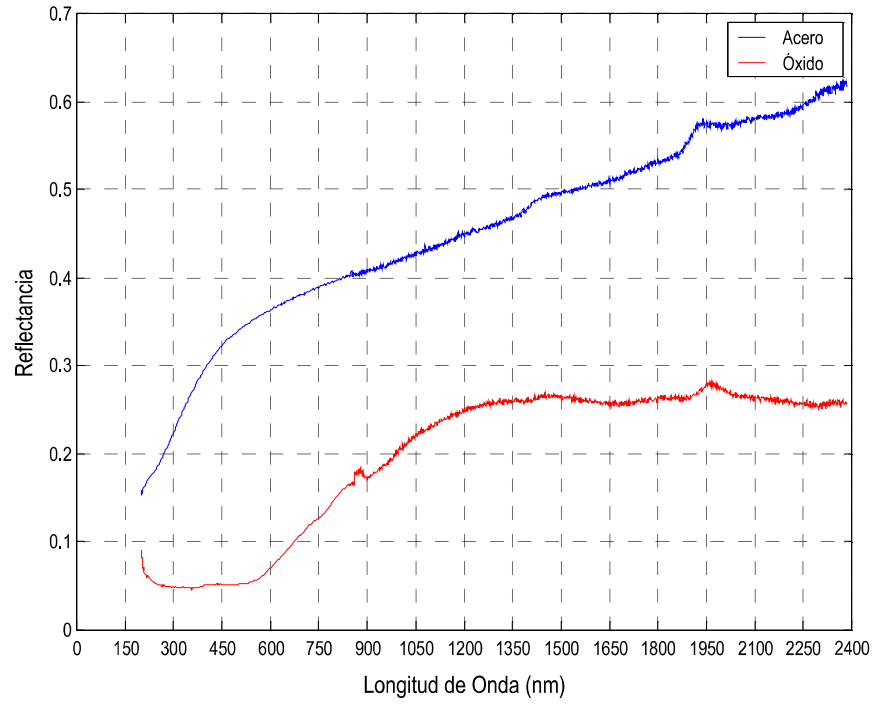
6.3.2 *Reflectancias de las muestras.*

Los experimentos realizados sobre cada una de las muestras para la obtención de la reflectancia del acero inoxidable (curva de color *azul*) y del óxido residual (curva de color *rojo*) quedan resumidos en las curvas espectrales pertenecientes a las figuras 6.7, 6.8 y 6.9. La reflectancia viene dada en tanto por uno.

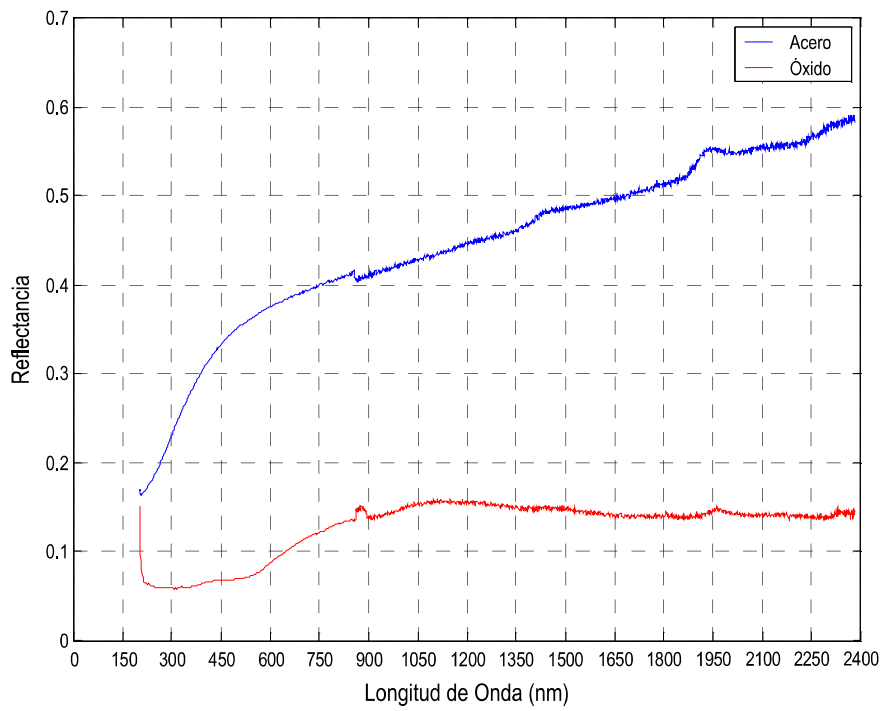
En las curvas espectrales se puede observar lo siguiente:

- La reflectancia del acero inoxidable es siempre mayor que la reflectancia del óxido residual para una misma longitud de onda.
- Ni en el acero inoxidable ni en el óxido residual se aprecian crestas o valles lo suficientemente grandes o profundos como para poder hacer una discriminación fiable entre ambos dentro de un rango determinado de longitudes de onda. Este hecho elimina toda posibilidad de emplear un filtro interferencial, correspondiente con estos máximos o mínimos, para discriminar el acero inoxidable del óxido residual.
- En las curvas espectrales se puede observar una mayor oscilación de la reflectancia dentro de la banda del infrarrojo cercano. En bandas de menor longitud de onda, como son la banda visible y ultravioleta, no se aprecia esta oscilación tan acusada. Como regla general, será más conveniente trabajar en aquellos rangos de longitudes de onda donde menor sea la dispersión de la reflectancia: en este caso, las bandas ultravioleta y visible.
- En general, la reflectancia en el acero inoxidable es creciente teniendo una pendiente más acentuada a bajas longitudes de onda.

- Dentro del rango $225 - 550 \text{ nm}$, se observa la existencia de una pequeña banda en la que la reflectancia del óxido residual es prácticamente constante.
- Conforme la longitud de onda crece la reflectancia en el óxido residual tiende a aproximarse a un valor constante. Esto ocurre, aproximadamente, a partir de los 1200 nm ya en la banda del infrarrojo cercano.
- En la mayoría de las curvas se puede apreciar una caída de la reflectancia entre los 200 nm y 225 nm siendo más acusada en las curvas de óxido residual.
- Otro hecho que se aprecia en la mayoría de las curvas es la aparición de un pequeño pico de reflectancia en torno a los 900 nm .

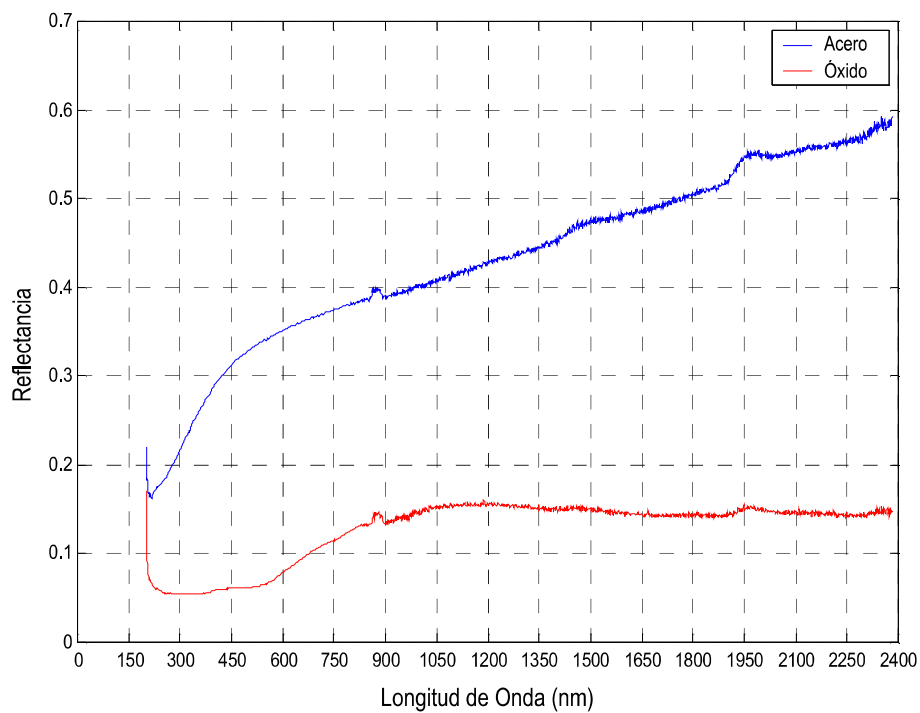


(a) Muestra 1.

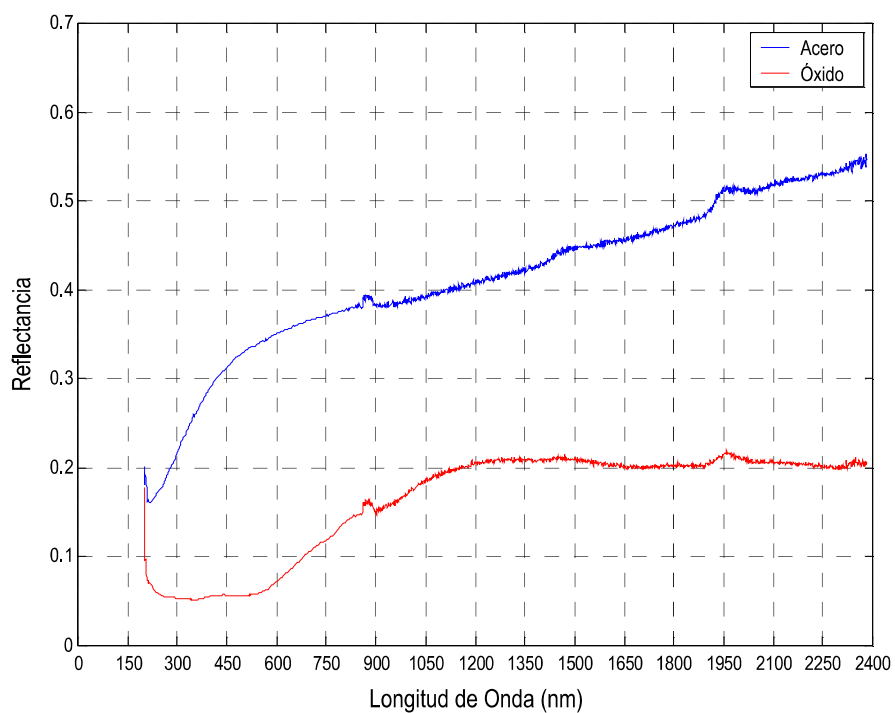


(b) Muestra 2.

Figura 6.7: Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 1 y 2.

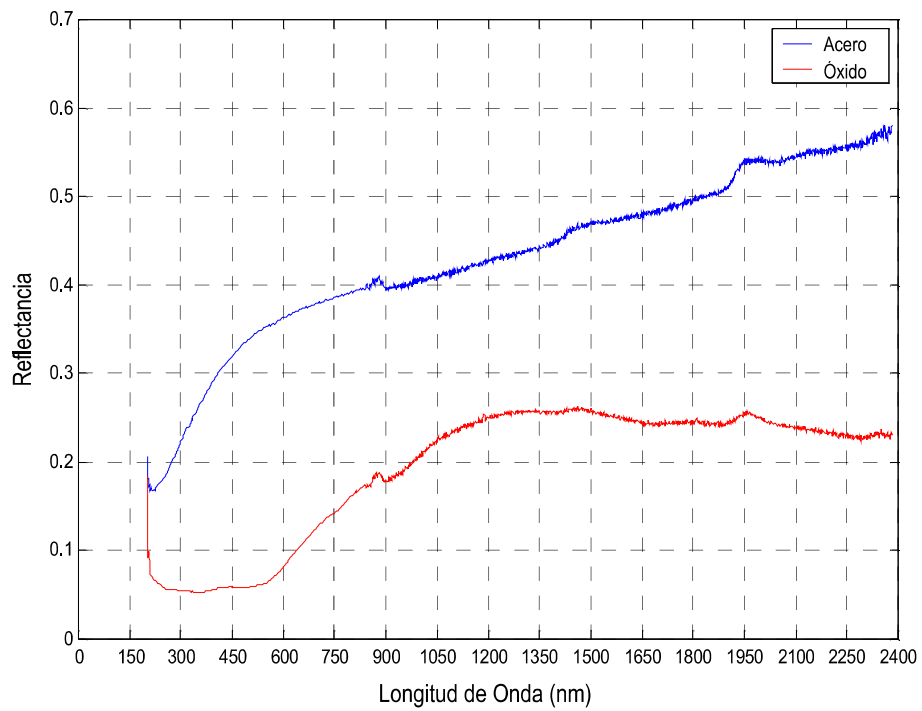


(a) Muestra 3.

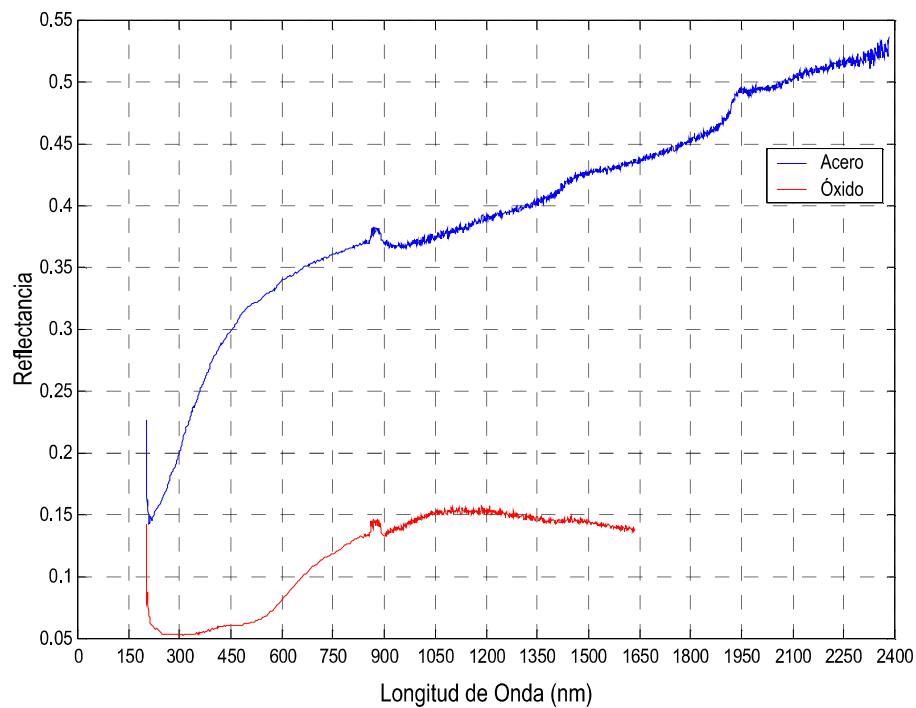


(b) Muestra 4.

Figura 6.8: Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 3 y 4.



(a) Muestra 5.



(b) Muestra 6.

Figura 6.9: Curvas espectrales de reflectancia para las muestras 5 y 6.

6.3.3 Bandas espectrales.

La curva mostrada en la figura 6.10a muestra la distribución de la reflectancia del óxido residual de la muestra 1 en las bandas del espectro correspondientes con el ultravioleta cercano, visible e infrarrojo cercano. La figura 6.10b muestra una ampliación en la banda visible.

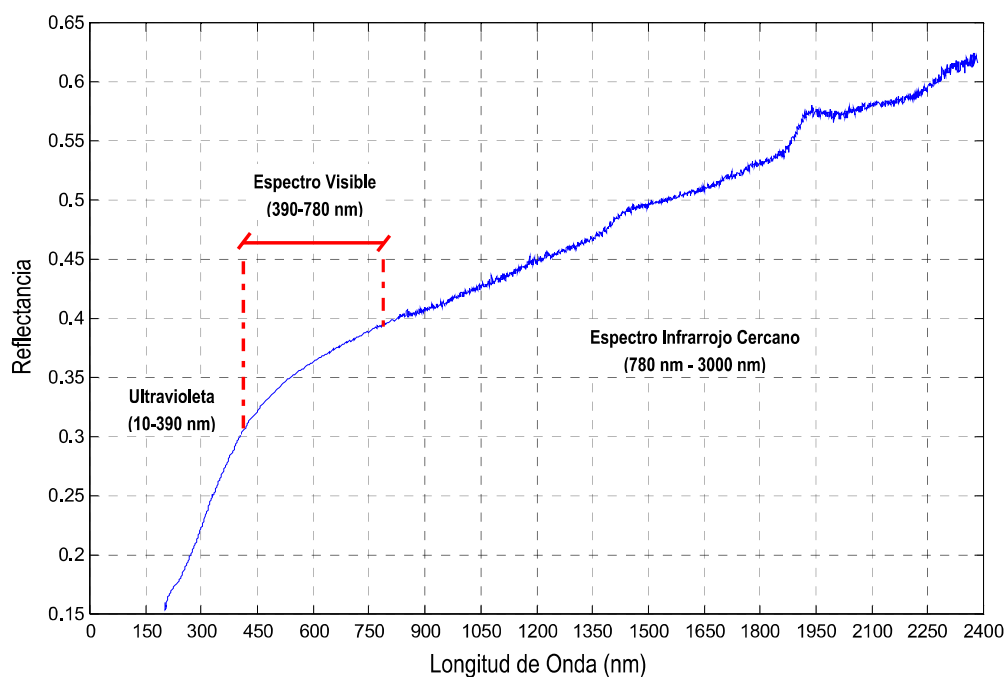
6.3.4 Promedios y desviaciones.

Con los datos de reflectancia obtenidos de las seis muestras de acero inoxidable y óxido residual se calcula el promedio de las reflectancias para cada valor de longitud de onda obteniéndose dos nuevas curvas espectrales $\overline{R_{\text{acero}}}$ y $\overline{R_{\text{óxido}}}$ (figura 6.11a). Posteriormente se calcula la desviación estándar respecto al valor promedio obteniéndose otras dos nuevas curvas espectrales $\overline{\sigma_{\text{acero}}}$ y $\overline{\sigma_{\text{óxido}}}$ (figura 6.11b).

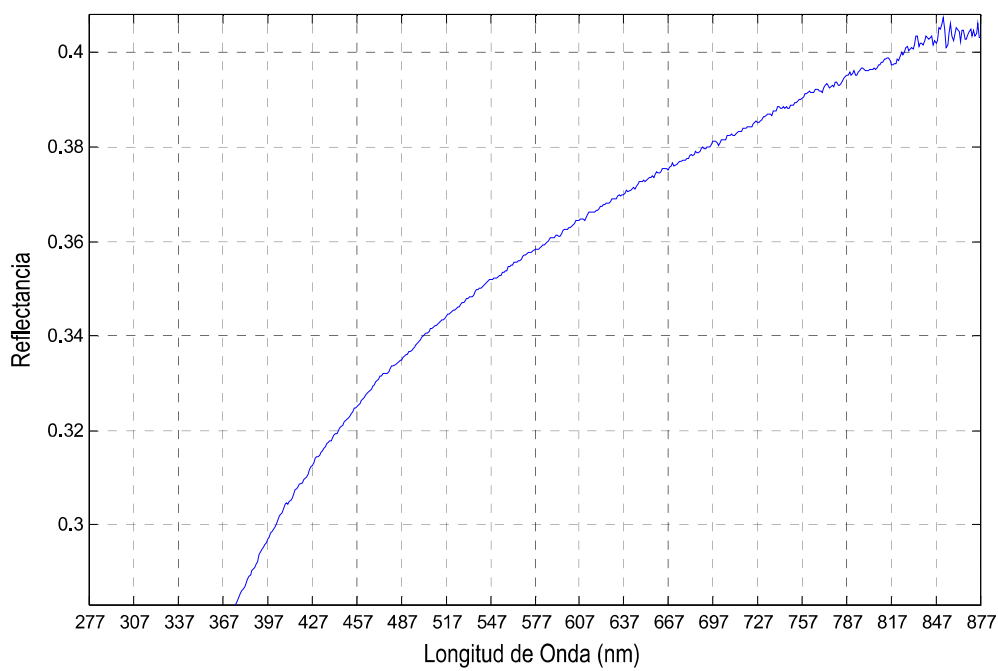
En las nuevas curvas espectrales correspondientes al promedio de reflectancias se pueden hacer las mismas consideraciones que se hicieron con las seis muestras. En lo que respecta a la desviación estándar (se exceptúan aquellos valores en el entorno de los 200 nm):

- En el caso del acero inoxidable, se observa una curva irregular de tendencia creciente y pendiente relativamente constante. La variabilidad global de la reflectancia en el intervalo de longitud de onda 225 – 2400 nm es bastante pequeña (entre 0,01 y 0,03 aproximadamente).
- La curva espectral obtenida para el óxido residual es diferente observándose tres tramos. Un primer tramo, entre 225 y 675 nm, con una tendencia creciente suave y de pendiente similar a la obtenida para el acero inoxidable pero que en valor absoluto se encuentra por debajo de ésta 0,005. Un segundo tramo, comprendido entre los 675 y los 1350 nm, con una pendiente pronunciada en la que cruza y supera la desviación del acero inoxidable. Y un último tramo irregular que marca una tendencia más o menos constante en torno a un valor de reflectancia de 0,05.
- En ambas curvas se pueden observar que la dispersión de los datos es menor en aquellas longitudes de onda menores a 850 nm. A partir de este valor la dispersión aumenta en gran medida.

De nuevo, el mejor rango de trabajo se encuentra en una zona comprendida entre la banda ultravioleta cercana y visible (225 y 675 nm).



(a) Bandas espectrales ultravioleta, visible e infrarroja.



(b) Banda espectral visible.

Figura 6.10: Distribución de las reflectancias para muestra 1.

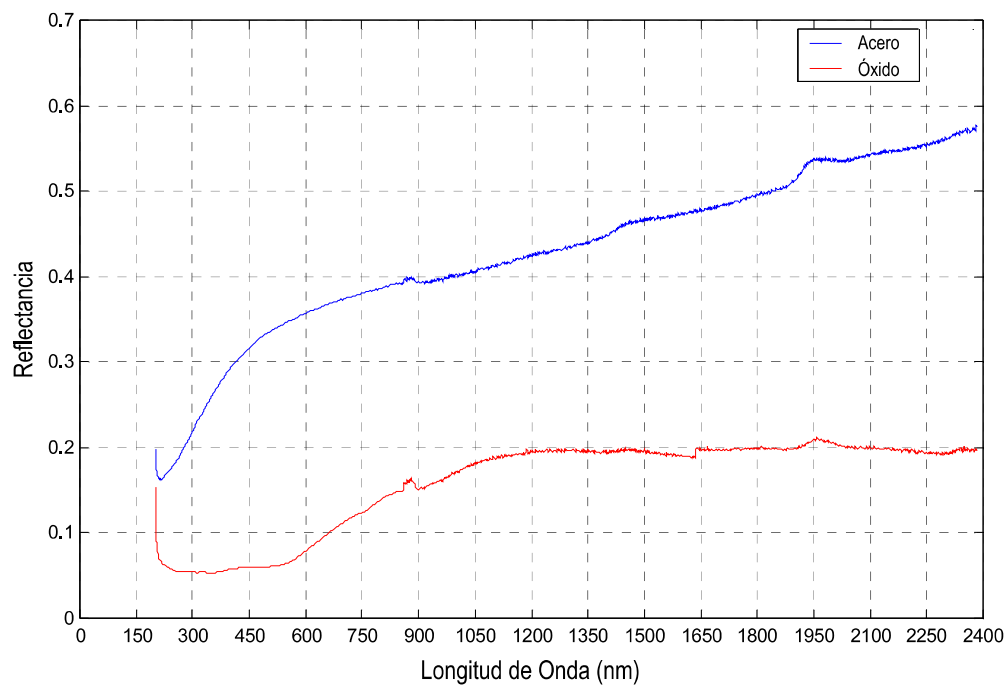
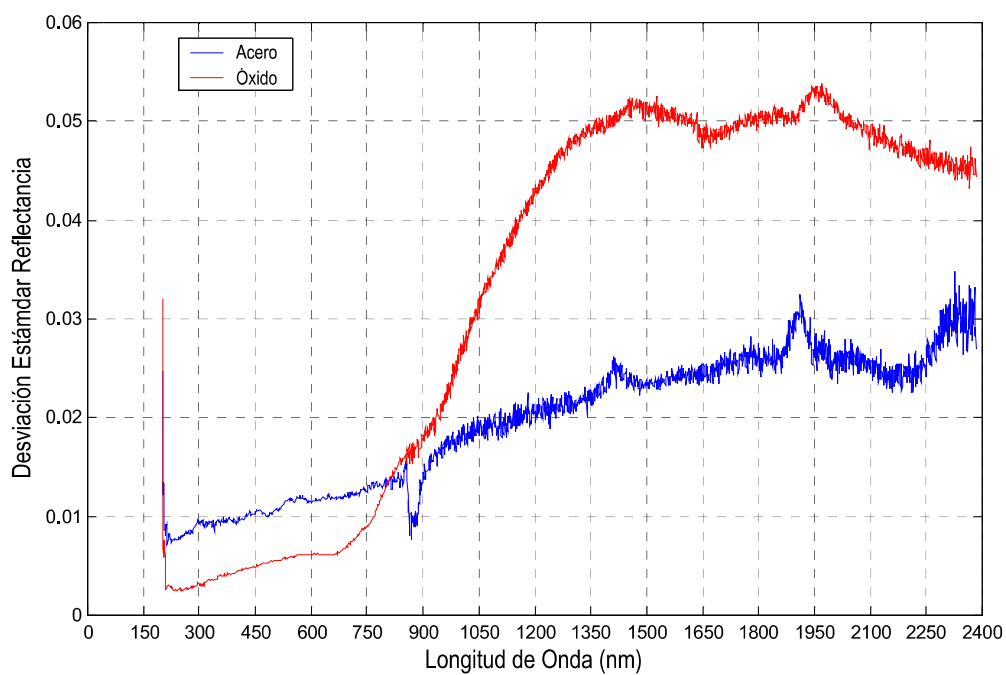
(a) Promedio ($\overline{R_{\text{acero}}}$ y $\overline{R_{\text{óxido}}}$).(b) Desviación estándar ($\overline{\sigma_{\text{acero}}}$ y $\overline{\sigma_{\text{óxido}}}$).

Figura 6.11: Promedio y desviación estándar de reflectancias de muestras.

6.3.5 Diferencia entre reflectancias.

Partiendo de los datos de los promedios de reflectancias representados en la figura 6.11a se ha calculado para cada valor de longitud de onda la diferencia entre la reflectancia promedio en el acero inoxidable $\overline{R}_{\text{acero}}$ y la reflectancia promedio en el óxido residual $\overline{R}_{\text{óxido}}$ obteniéndose una nueva curva (figura 6.12).

En esta curva se puede observar que el máximo global coincidirá con el mayor valor de longitud de onda ($\approx 2400 \text{ nm}$). No obstante, el hecho más relevante que puede observarse es el máximo local que aparece dentro del rango de longitudes de onda que, con anterioridad, se había considerado como mejor rango de trabajo (225 nm y 675 nm). Este máximo, con un valor de reflectancia es $0,281$, se produce en el entorno de los 550 nm dentro de la zona visible del espectro electromagnético coincidiendo con aquellas longitudes de onda consideradas como el color verde.

Analizando los valores de reflectancia en los extremos del espectro visible se observa que para las longitudes de onda 380 nm y 780 nm se tienen reflectancias de $0,221$ y $0,253$ respectivamente. Por otro lado, en este rango de longitudes de onda la máxima variación de reflectancia es de $0,05$ un valor relativamente pequeño.

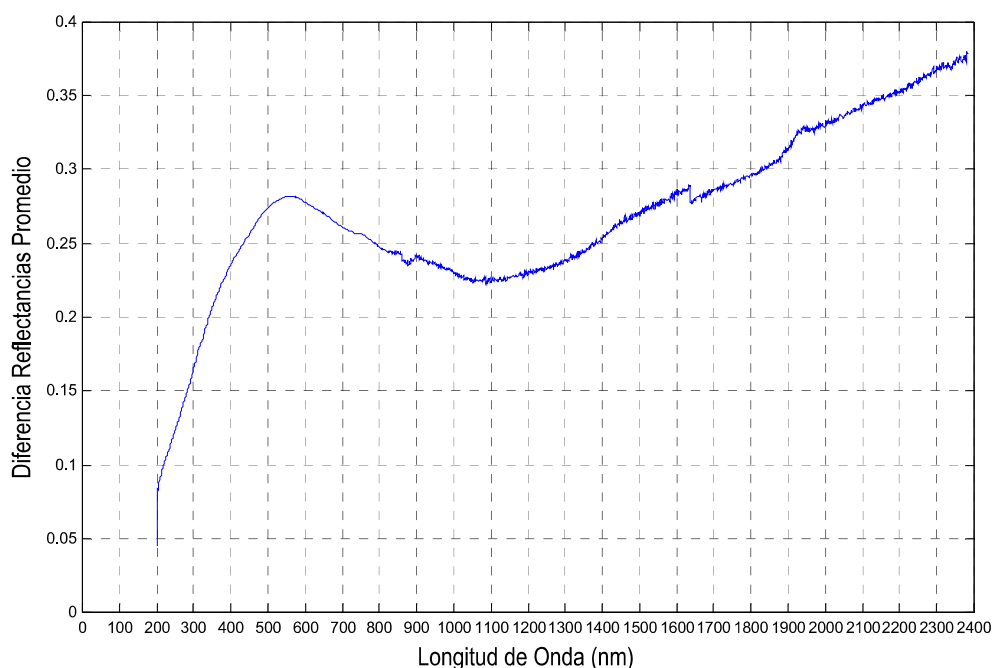


Figura 6.12: Diferencia reflectancias promedio ($\overline{R}_{\text{acero}} - \overline{R}_{\text{óxido}}$).

6.3.6 Conclusiones.

Tras el análisis de las curvas espectrales en los apartados anteriores se puede concluir que las mejores condiciones para discriminar el acero inoxidable del óxido residual se obtienen dentro del rango de longitudes de onda del espectro visible y, en concreto, para las correspondientes al color verde justo en el entorno de los 550 nm.

Parte II

PROPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

En capítulos anteriores se han desarrollado distintos aspectos que sirven de base para establecer unas líneas guía genéricas sobre las que apoyarse para plantear una solución al problema de la detección de óxido residual mediante visión por computador.

En concreto, en el capítulo 2, se han tratado algunos conceptos relacionados con la inspección de la calidad dentro del ámbito industrial, los sistemas de inspección automatizados y qué soluciones pueden aportar en distintos ámbitos. Dentro de este tipo de sistemas, se estudiaron los sistemas de inspección visual, la problemática que plantean y cómo la inspección automatizada puede ser una alternativa a la inspección realizada por un operador humano a pesar de tener también sus propios inconvenientes. Se introdujeron algunos aspectos de la visión por computador, su aplicación al ámbito industrial (machine vision), los elementos que componen un sistema de inspección visual automatizado y una visión genérica de las etapas que componen la visión por computador y su particularización a sistemas industriales. Finalmente, se mostraron qué criterios y cuáles son los factores clave que hay que tener en cuenta para el diseño de un sistema de visión industrial automatizado.

El capítulo 3 abordó cuestiones fundamentales a resolver cuando se diseña un sistema de visión industrial automatizado. Una primera etapa donde se definen las especificaciones del sistema: cuál va a ser el objetivo de la tarea de visión y qué beneficio se va a obtener con su aplicación, una descripción del objeto a inspeccionar y cómo va a presentarse ante el sistema de visión, que espacio ocupará y cuál será su entorno de operación, qué requerimientos de funcionamiento se van a imponer y cómo va a integrarse el sistema en la factoría. En la segunda etapa, se realiza el diseño propiamente dicho del sistema a partir de las especificaciones consideradas anteriormente. El diseño del sistema de visión define la solución que posteriormente ha de implementarse para que el sistema opere y cumpla con las especificaciones definidas para éste. Entre otros aspectos no menos importantes, se seleccionarán la cámara y óptica a utilizar, elementos hardware necesarios, el sistema de iluminación y otros aspectos relacionados con el diseño mecánico y eléctrico, y por último, el software necesario.

En el capítulo 4, se profundizó en las etapas que componen el procesamiento de imagen explicando una serie de fundamentos básicos relacionados con cada etapa. Se hizo un especial énfasis sobre las técnicas de segmentación mediante umbralización realizando una revisión del estado del arte de las diversas soluciones que se pueden aplicar hoy en día basadas en este tipo de segmentación. Por otro lado, se desarrollaron ciertas técnicas de preprocesamiento y postprocesamiento que, *a posteriori*, se necesitarán cuando se plantee una solución de procesamiento de imagen para la detección de óxido residual.

El capítulo 5 muestra una revisión del estado del arte sobre las técnicas de detección y clasificación de defectos que se han desarrollado durante los últimos años en el ámbito de la producción de productos de acero inoxidable y que han aparecido en distintos artículos de investigación como una forma de aproximarse a una solución para el problema de la detección de óxido residual.

Uno de los capítulos fundamentales, capítulo 6, describió el elemento primordial objeto de detección y de la presente tesis: el óxido residual. Se explicó cómo es el proceso de formación del óxido dentro de una línea de recocido y decapado y cuáles son sus características fundamentales. Por último, se mostró un estudio espectrofotométrico, realizado por el *Instituto de Automática Industrial (IAI)* del *Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)* en Madrid, donde se comparan las características reflectivas del óxido residual y del acero inoxidable cuyas conclusiones son de gran interés y fundamentales para el desarrollo de esta tesis, ya que, sobre ellas se apoya.

Esta parte de la memoria de tesis versa sobre la propuesta de diseño del sistema de detección de óxido residual desde el punto de vista de la adquisición de imágenes y su procesamiento. Los fundamentos presentados con anterioridad para el diseño del sistema de inspección serán ahora particularizados mediante una serie de criterios y especificaciones.

El presente capítulo se limita a desarrollar aquellos aspectos relacionados con el diseño del proceso de adquisición de imagen como paso previo a su procesamiento digital.

7.1 LA IMAGEN COMO RESULTADO DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN.

Cuando se implementa un sistema de visión, el proceso de adquisición de imágenes es la parte más importante. Cualquier deficiencia durante la etapa de adquisición va a causar problemas en las siguientes etapas de procesamiento y análisis de imagen [21].

La finalidad del proceso de adquisición es la obtención de imágenes digitales con unas características y cualidades adecuadas para ser procesadas y analizadas en etapas posteriores. Una imagen digital es una representación numérica de un objeto físico real, por lo tanto, el objetivo es obtener una representación espacial (*geométrica*) y espectral (*luz*) con el suficiente detalle (*resolución*).

Durante el presente capítulo se establecerá un procedimiento de adquisición de imágenes particularizado a la tarea de detección de óxido residual sobre superficies de acero inoxidable dentro del entorno industrial donde será implantado el sistema de visión.

El procedimiento estará fundamentado en la secuencia de actividades para el diseño de un sistema ya tratada con anterioridad en el capítulo 3.

En lo que respecta a las actividades, se tendrán en cuenta aquellas relacionas con la especificación y el diseño del sistema quedando excluidas la evaluación de costes y las actividades de desarrollo, instalación y puesta en marcha del sistema.

7.2 ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA.

La especificación tiene por objetivo la definición clara y precisa de todas aquellas funcionalidades y restricciones del sistema de visión que van a servir de base para posteriormente acometer su diseño. La información se ha organizado en una serie de puntos cada uno de los cuales trata un aspecto en concreto de la especificación del sistema. Son los siguientes:

- Tarea de visión.
- Beneficios obtenidos.
- Tipo de sistema.
- Descripción del objeto a inspeccionar.
- Presentación.
- Requerimientos de funcionamiento.
- Interfaces de información.
- Consideraciones del entorno.

7.2.1 Tarea de visión.

La detección de óxido residual va a entrar dentro de lo que se define como una *inspección superficial* (tabla 3.1a) del tipo *gradual* o *híbrida* (mezcla de una *inspección por atributos* o *cualitativa* y una *inspección por variables* o *cuantitativa*), es decir, la clasificación del óxido residual basándose en el grado de aceptabilidad definido para este defecto. El tipo de evaluación será una *inspección* (tabla 3.1b) ya que lo que se pretende es el chequeo posterior tras el proceso de decapado de la bobina donde todavía es posible tomar medidas correctivas de *control* (tabla 3.1c) que permitan corregir el problema.

7.2.2 Beneficios obtenidos.

Los beneficios que se van a obtener de una inspección visual automatizada del óxido residual van a ser varios:

- *Solidez* de la detección. Aunque la automatización de la tarea de detección de óxido no va a alcanzar una tasa de acierto del 100 % sí que mejorará ampliamente la inspección manual realizada por el operador humano. Los datos obtenidos deberán ser consistentes y completos generando informes fiables del óxido residual detectado sobre la superficie de la bobina.
- *Resultados objetivos*. La detección automatizada genera resultados objetivos frente a criterios subjetivos innatos en el humano. Por ejemplo, no todos los operadores son capaces de detectar manchas de óxido residual de tamaño inferior a $100\ \mu\text{m}$ y el criterio que utiliza cada uno de ellos para asignar un tamaño u otro a las manchas de óxido diferirá entre ellos.
- *Mayor superficie* inspeccionada y *aumento* de la *productividad*. Para posibilitar que el personal de control de calidad inspeccione la superficie, el movimiento de desplazamiento de la banda debe ser detenido durante unos segundos. Esto no es posible hacerlo todo el tiempo, ya que reduciría el ritmo de producción de la línea, sino que suele limitarse a un número entre cinco y diez paradas. La automatización de la tarea de detección permitirá realizar muchas más inspecciones sin tener que detener la banda lo que significa una mayor superficie inspeccionada y un ritmo de producción más elevado.
- *Seguridad*. Se evita que el operador humano realice una tarea en la que entra en contacto con la superficie eliminando un riesgo importante para su persona.

7.2.3 Tipo de sistema.

El tipo de sistema se clasifica según el criterio aplicado:

- Por su *dimensionalidad*, el sistema realizará una inspección en dos dimensiones (adquiere y procesa imágenes de la superficie de la bobina).
- El sistema tendrá que adaptarse para realizar la detección de óxido en bobinas de acero inoxidable de distinta composición química, acabado, dimensiones geométricas, velocidades de producción, etc. Así, tanto la *complejidad* del sistema como su grado de *flexibilidad* van a ser altos.



(a) Bobinas



(b) Movimiento continuo.

Figura 7.1: Tipo de producción.

- El sistema de visión estará basado en PC: compuesto de un procesador de propósito general integrado en placa base, memoria, disco duro, tarjeta capturadora e interfaces de red y comunicación serie funcionando bajo un sistema operativo Windows estándar. La aplicación de procesamiento estará basada en:
 - Librerías para control de la tarjeta capturadora y cámara (control de la adquisición).
 - Algoritmos de procesamiento específicos.

7.2.4 Descripción del objeto a inspeccionar.

Tipo de producción.

La inspección de la superficie de las bobinas se realiza a la salida de la sección de decapado de la línea de recocido y decapado continuo¹. En este tipo de líneas, las bobinas (figura 7.1a) son procesadas secuencialmente mediante un sistema de bucles acumuladores con los que se consiguen que la velocidad de desplazamiento de la banda sea prácticamente constante a lo largo de las secciones de recocido y decapado. Por tanto, se tiene un material en flujo continuo de producción o producción de movimiento continuo (figura 7.1b).

Material y Acabado superficial.

El material de las bobinas que van a ser inspeccionadas para la detección de óxido residual es acero inoxidable perteneciente a las familias *austenítica* y *dúplex*.

Respecto al *acabado superficial* de las bobinas, se trata de acabados estándar según la clasificación internacional ASTM A480/A480M [369]:

¹ Ver sección 6.2.1 en capítulo 6

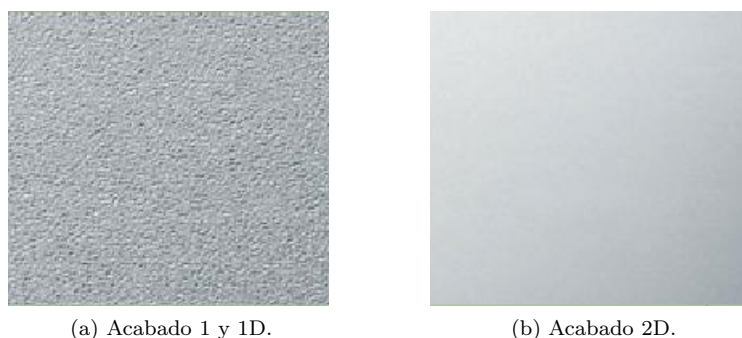


Figura 7.2: Acabados superficiales.

- Acabado 1 y 1D (figura 7.2a).

Laminado en caliente, recocido y decapado. Acabado frecuente en espesores generalmente entre 3 y 10 mm con anchos típicos de 1000, 1200 y 1500 mm. Este tipo de superficie es propia de las bobinas más gruesas. Tiene una apariencia mate y una reflectividad relativamente baja. El acabado 1D es igual que el acabado 1 pero con una pequeña reducción del espesor. Rugosidad superficial² típica $R_a \approx [4,0 \cdots 7,0] \mu\text{m}$ [370].

- Acabado 2D (figura 7.2b).

Laminado en frío, recocido y decapado. Mucho menos rugoso que el acabado 1 y 1D pero la superficie sigue siendo mate con una reflectividad un poco más alta. Los espesores más usuales varían entre 0,5 y 10 mm con anchos típicos de 1500 mm. Rugosidad superficial típica $R_a \approx [0,4 \cdots 1,0] \mu\text{m}$ [370].

La reflectancia de la superficie de un acero va a depender fundamentalmente de su composición química y del proceso de fabricación que se lleve a cabo (procesos térmicos como el recocido, procesos de decapado mecánico como el granallado, procesos de decapado químico como el decapado ácido, etc.). Estos procesos de fabricación afectarán en gran medida a propiedades como el tamaño de grano ([371]) y la homogeneidad de la estructura.

Al finalizar el proceso de producción se va a obtener un acero *brillante* cuando la componente reflectiva especular es relativamente alta y la componente reflectiva difusa baja y se tendrá un acero *mate* cuando la componente especular es baja y la difusa tiene un valor intermedio.

Como principio general, se considera que el material tiene una reflexión especular cuando las dimensiones de las irregularidades de su superficie (diferencia entre valles y crestas) son pequeñas comparadas con la longitud de onda λ del haz incidente con que se ilumina. La *condición de Rayleigh* [109] determina que para que exista una reflexión especular las dimensiones de la diferencia de altura entre valles y crestas deberán de ser menores que $\lambda/4$. En caso contrario, la reflexión tendrá una componente difusa originando una reflexión *compuesta*, en caso de que parte de la reflexión sea especular, que es la que se da en la mayoría de los casos o *difusa* perfecta o lambertiana, en caso de que no exista componente especular³.

² Algunos detalles sobre texturas superficiales y parámetros relativos a la rugosidad se describen en la sección B.5.1 del apéndice B.

³ En el apéndice B, sección B.6, se explican los distintos tipos de superficie existentes.

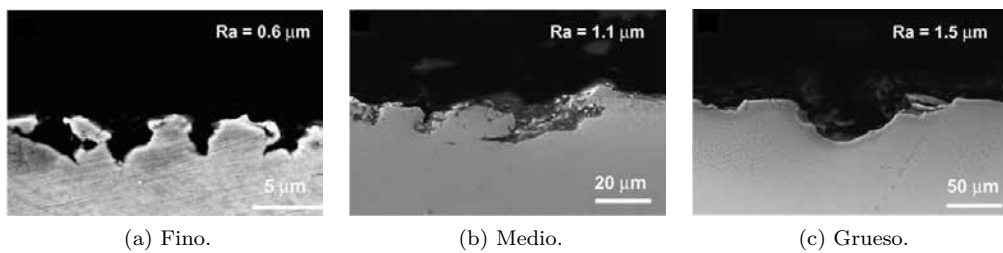


Figura 7.3: Tamaños de grano (acero inoxidable austenítico tipo 304).

La *microestructura* de la superficie (rugosidad y calidad superficial) influenciará la *forma* en la que el rayo incidente es reflejado mientras que la *macroestructura* geométrica de la superficie (ondulación, orientación y defectos) determinará la *dirección* del haz reflejado [109].

En la microestructura, conforme disminuye la rugosidad R_a la reflexión se va haciendo cada vez más especular obteniendo un acero más reflectivo. El valor de la rugosidad R_a dependerá del tamaño de grano de tal manera que tamaños menores se corresponden con valores de rugosidad más pequeños [354]. La distribución espacial de los granos también va a afectar a la rugosidad de la superficie haciendo que ésta tenga una mayor variabilidad cuanto más heterogénea sea la distribución.

La figura 7.3 muestra imágenes de secciones transversales de un mismo tipo de acero inoxidable con tres tamaños diferentes de grano: fino, medio y grueso [372].

En lo referente a la macroestructura, los parámetros de espaciado d_o y altura de la ondulación h_o , el patrón de la textura y los defectos superficiales (grietas, rayaduras, marcas, etc.) determinan la dirección del haz reflejado⁴.

Las figuras 7.4a, 7.4c y 7.4e muestran imágenes de tres aceros inoxidables con distinta textura (superficies de dimensión $8,25 \times 8,25$ mm) donde se observa la distribución de los granos sobre la superficie en forma de alternancias entre zonas más oscuras (valles) y zonas más claras (crestas). Una textura con mayor concentración de granos hace que la superficie ocupada por las crestas sea mayor que la ocupada por los valles (figuras 7.4b, 7.4d y 7.4e) apreciándose una superficie más brillante (figuras 7.4a, 7.4c y 7.4e).

La textura de la superficie puede verse interrumpida o modificada por defectos macroestructurales de origen diverso (golpes, marcas de cilindros y rodillos, huellas de refractario, grietas, marcas de cepillos, etc.) afectando a la reflectividad (figura 7.5a). Otras veces, la alteración de la textura puede estar originada por las soldaduras que unen las bobinas (figura 7.5b). Finalmente, la reflectividad de la superficie también puede verse afectada por manchas provocadas por fluidos como el agua y el aceite (figura 7.5c).

⁴ En apéndice B sección B.5.2, se muestra en detalle la modelización de la rugosidad superficial.

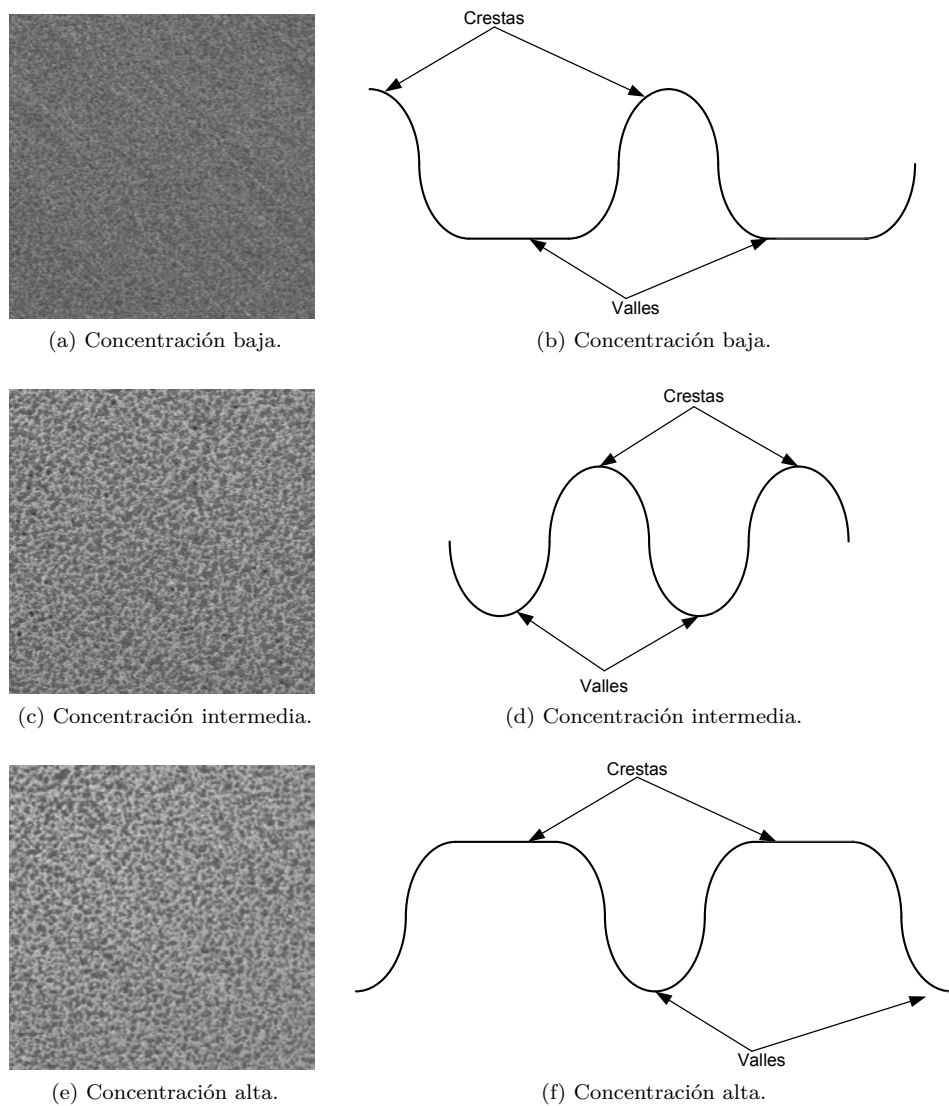


Figura 7.4: Tipos de texturas de superficies.

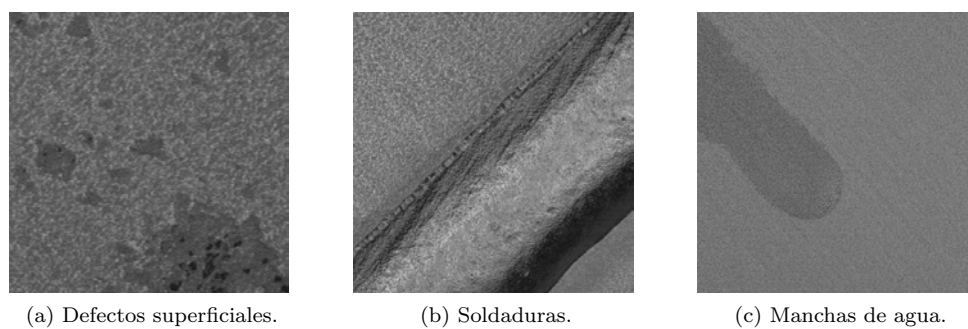


Figura 7.5: Alteraciones en superficie.

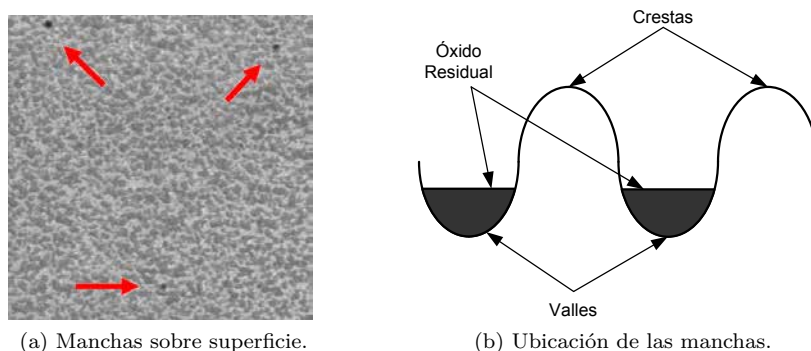


Figura 7.6: Óxido residual.

Características y dimensiones del óxido residual.

El óxido residual suele agruparse sobre la superficie del acero formando manchas de tamaños comprendidos entre $50\ \mu\text{m}$ y $200\ \mu\text{m}$. Cuando se observa una superficie con manchas de óxido (figura 7.6a), éstas tienen un color gris oscuro que contrasta con los grises un poco más claros de la textura de la superficie del acero (ver *Propiedades ópticas de los metales* en apéndice B sección B.7). Esta disparidad se debe a que existe cierta diferencia entre los valores de reflectancia del óxido y del acero (ver *Estudio espectrofotométrico* en capítulo 6 sección 6.3).

Las manchas de óxido tienen tendencia a quedarse alojadas en las zonas más profundas o valles de la topografía de la superficie (figura 7.6b) donde los procesos de decapado mecánico y químico resultan ser menos eficaces debido a la dificultad que tienen estos procesos para actuar en las zonas más internas de la capa de óxido, sobre todo, cuando alguna de las variables que influyen en el decapado supera los límites de control del proceso (ver *Mecanismo de eliminación de la capa de óxido* en capítulo 6 sección 6.2).

Estas manchas suelen presentarse de forma muy variada en geometría y tamaño. Respecto a su distribución sobre la superficie, pueden estar repartidas de forma aleatoria, concentradas sobre ciertas zonas (debido a defectos como grietas, marcas, arañazos, etc., o a fallos en algún proceso como el cepillado de la superficie originado por el deterioro de algún cepillo) u orientadas en alguna dirección de la textura superficial (figura 7.7).

7.2.5 Restricciones debidas a la ubicación.

La superficie de la bobina va a desplazarse a lo largo de la línea de recocido y decapado en forma de plancha continua (o banda) pasando, durante este desplazamiento, bajo el sistema de inspección.

Éste se ubicará al final de la sección de descascarillado y decapado de la bobina justo antes del bucle (ver figura 6.2) de manera que pueda anticiparse cualquier actuación de control correctiva del proceso de decapado. Dentro de esta zona, el sistema deberá instalarse en un punto donde la banda sea lo suficientemente firme y estable posibilitando una inspección sin riesgo para su integridad.

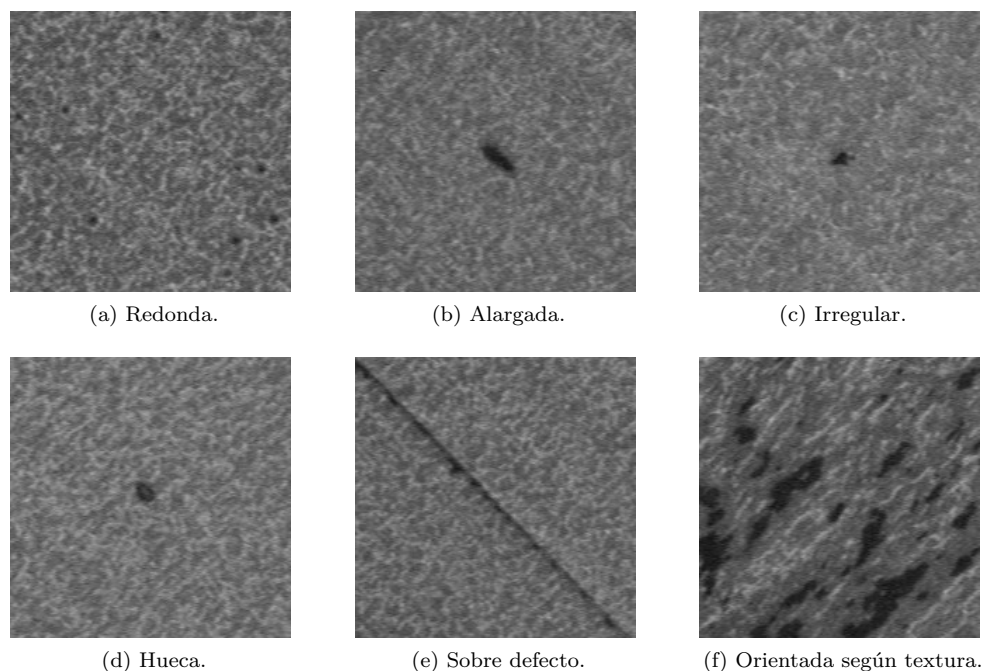


Figura 7.7: Manchas de óxido residual (imágenes de $4,12 \times 4,12$ mm).

Las *restricciones y condiciones* impuestas para la ejecución de la tarea de visión en esta ubicación son las siguientes:

- La *distancia de trabajo* d_{obj} entre la cámara y la superficie de inspección se fijará en 300 mm. Debido fundamentalmente a dos razones:
 - Incrementar la seguridad del sistema. Cualquier desplazamiento fortuito de la banda podría golpear el sistema de adquisición.
 - Restricciones del sistema de iluminación. Como se verá más adelante, se requerirá una distancia cercana a la superficie para poder implementar la técnica de iluminación más apropiada para la inspección. Esta menor distancia contribuirá también a unos menores requerimientos de potencia de iluminación redundando en un sistema más pequeño y compacto.
- Los *espesores de las bobinas* a inspeccionar quedan comprendidos entre 0,5 y 10 mm.
- La *velocidad de desplazamiento de la banda* a su paso por el sistema de visión variará entre 6 y 60 m/min.

Las *características del entorno* de operación son las siguientes:

- Luz ambiental. No será un factor que interfiera en el sistema de visión.
- Suciedad, polvo y líquidos y otros. El alto grado de suciedad, polvo y proyección ocasional de aceite y agua en el entorno requiere la estanqueidad del sistema.



Figura 7.8: Rodillo tensor.

- Ambiente corrosivo. El sistema se ubica a la salida de la sección de decapado químico donde las emanaciones de ácidos procedentes de los tanques originan un ambiente altamente corrosivo. Igualmente, se requerirá la estanqueidad del sistema y medidas de protección frente a la corrosión.
- Vibraciones e impactos. El nivel de vibración generado por las partes móviles de los elementos de la línea no interfiere sobre el sistema de forma sustancial. En cambio, el sistema podría recibir fuertes impactos de manera eventual por lo que es muy importante aplicar medidas de protección frente a impactos (carcasas de protección, fijación de protecciones mecánicas en la línea, etc.) y detectar aquellas condiciones peligrosas para su integridad.
- Temperaturas. Los elementos que conforman el sistema deberán estar preparados para trabajar en un rango de temperaturas comprendido entre 15 y 45 ° C.

Una de las sitios más adecuadas para la instalación del sistema en la línea es junto a un rodillo tensor⁵ donde la banda queda perfectamente abrazada a la superficie de éste en su movimiento de desplazamiento (figura 7.8).

Este lugar tiene el inconveniente de que la superficie a inspeccionar no se encuentra plana sino curvada abrazada al tensor de radio r y podría afectar a los resultados del proceso de adquisición. Para evaluar esta situación, se realiza seguidamente un estudio pormenorizado.

Supongamos el caso ideal de un tensor con un radio r y una pequeña superficie de longitud L (\overline{ac}), completamente plana, inspeccionada por una cámara dispuesta perpendicularmente a la superficie situada a una distancia de d_{obj} y con una óptica que permite un semiángulo de visión α (figura 7.9a).

⁵ Cilindro de aproximadamente 1500 mm de diámetro y 4712,39 mm de generatriz.

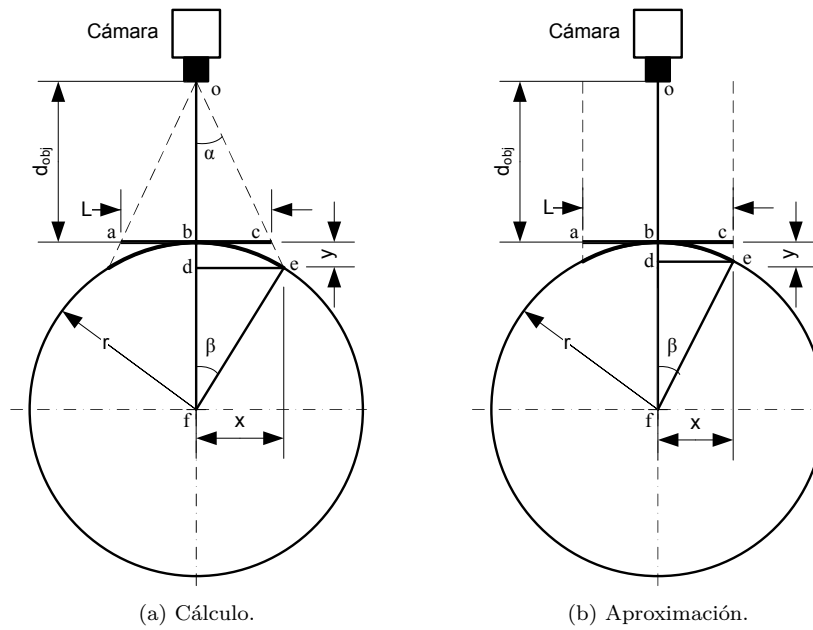


Figura 7.9: Inspección sobre rodillo tensor.

Puede observarse que el segmento rectilíneo \overline{bc} inspeccionado en la superficie plana se convertiría en un segmento curvilíneo \overline{be} sobre la superficie del tensor. Esto afectaría a la adquisición de imágenes de varias formas:

- Profundidad de campo, DOF. Los puntos a lo largo del segmento \overline{be} , una vez mapeados por la óptica de la cámara al plano imagen, ya no se encontrarían en el mismo plano y podrían aparecer desenfocados en la imagen. La máxima variación ocurriría en el punto e que se encontraría a una distancia y del segmento \overline{bc} .
- Campo de visión, FOV. Aumenta, pasando de inspeccionar un segmento \overline{bc} a la proyección \overline{de} sobre el plano del segmento curvilíneo \overline{be} .
- Magnificación, β . Sería diferente en cada punto del segmento \overline{be} disminuyendo conforme nos acercamos al extremo e .

De la figura 7.9a podemos obtener varias ecuaciones. Aplicando proporcionalidad entre los triángulos $\triangle oab$ y $\triangle ocd$ obtenemos

$$\tan \alpha = \frac{L/2}{d_{obj}} = \frac{x}{d_{obj} + y} \quad (7.1)$$

Reordenando las variables x e y se tiene

$$\frac{2 \cdot d_{obj}}{L} \cdot x - y = d \quad (7.2)$$

Aplicando el cálculo de la hipotenusa sobre el triángulo $\triangle ecd$:

$$r^2 = (r - y)^2 + x^2 \quad (7.3)$$

Simplificando y reordenando se obtendría la ecuación:

$$x^2 + y^2 = 2 \cdot r \cdot y \quad (7.4)$$

Finalmente, despejando x de la ecuación 7.2, sustituyendo en la ecuación 7.4 y reordenando términos se obtendría una sencilla ecuación de segundo grado de incógnita y .

$$[L^2 + 4 \cdot d_{obj}^2] \cdot y^2 + [2 \cdot L^2 \cdot d_{obj} - 8 \cdot r \cdot d_{obj}^2] \cdot y + L^2 \cdot d_{obj}^2 = 0 \quad (7.5)$$

En el caso de que el semiángulo de visión fuera muy pequeño $\alpha \approx 0^\circ$ se podría realizar, con un mínimo error, la aproximación mostrada en la figura 7.9b simplificando el problema. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\sin \beta = \frac{L/2}{r} \quad (7.6)$$

$$\tan \beta = \frac{L/2}{r - y} \quad (7.7)$$

A modo de ejemplo, si se considera que en un tensor de $r = 750 \text{ mm}$ se inspecciona por la cámara una pequeña superficie de longitud $L = 52 \text{ mm}$ a una distancia $d_{obj} = 300 \text{ mm}$ se obtendría un valor $y = 0,1706 \text{ mm}$ aplicándose las ecuaciones 7.6 y 7.7.

Se puede comprobar que el valor de y es bastante pequeño si se compara con el rango de variación de los espesores nominales de las bobinas que son procesadas en la línea (entre 0,5 y 10 mm) por lo que el impacto que pueda tener sobre la profundidad de campo DOF (ver más adelante sección 7.3.3) o rango donde se consigue el enfoque de la superficie se podría despreciar. En cualquier caso, siempre será importante realizar este cálculo y compararlo con la DOF obtenida.

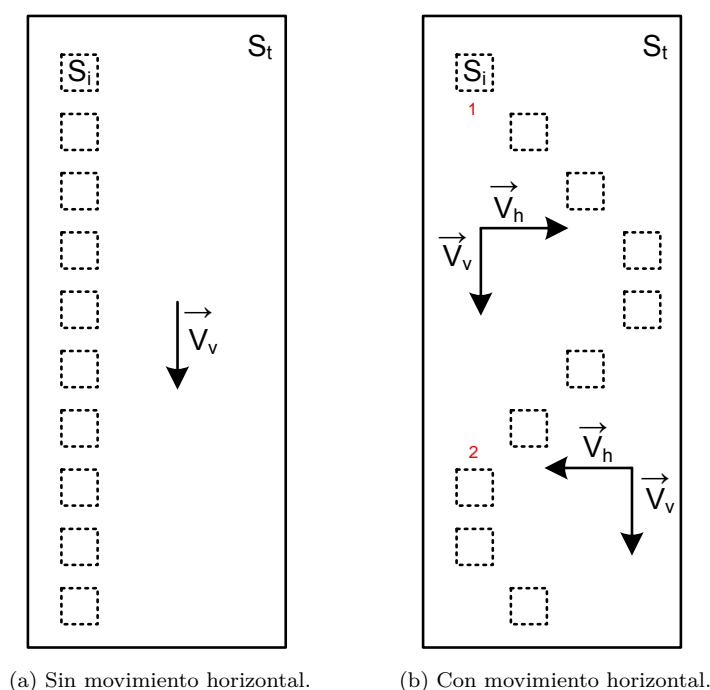


Figura 7.10: Muestreo de la superficie (vista en planta).

7.2.6 Análisis de velocidades y tiempo de exposición.

La velocidad de la banda \vec{V}_v a su paso por el sistema de inspección, va a ser prácticamente constante para la bobina que se está procesando pudiendo variar entre bobinas según el tratamiento térmico de recocido que se le dé y que será función de las características de cada bobina (composición química del acero, espesor, tratamientos previos, etc.). Existirá, por tanto, un rango de velocidades de desplazamiento de la banda comprendido entre 6 m/min, para los espesores mayores (10 mm), y 60 m/min, para los más pequeños (0,5 mm).

Si se considera que la superficie de la bobina S_t es muestreada con un sistema de inspección *fijo* los muestreos superficiales S_i realizados por la cámara, en caso de no haber solape entre muestras, quedarían reflejados como viene en la figura 7.10a. En el caso de que apareciera óxido residual fuera de la posición donde se encuentra el sistema sería imposible detectarlo con una sola cámara, a no ser que, se instalaran un número suficiente de ellas que cubrieran el ancho completo de la banda.

Una solución a la instalación de cámara fijas sería dotar al sistema de un *movimiento de barrido* transversal al desplazamiento de la banda (figura 7.10b). De esta manera, si el barrido se realiza a lo largo de todo el ancho de la banda cualquier parte de la superficie de la bobina va a poder ser escogida como muestra y si, además, esta elección tiene carácter aleatorio se podría alcanzar un alto grado de fiabilidad en los resultados.

La combinación del movimiento de desplazamiento de la banda \vec{V}_v y el movimiento de barrido horizontal \vec{V}_h describiría un muestreo superficial de forma parecida a un movimiento en zig-zag.

Cuanto mayor sea la velocidad de desplazamiento de la banda \vec{V}_v , mayor deberá ser la velocidad del movimiento de barrido \vec{V}_h y mayor la frecuencia de la adquisición de imágenes si se desean evitar pérdidas en la detección de defectos de óxido. De esta manera, se inspeccionaría una mayor superficie y se reduciría la probabilidad de no detectar defectos en aquellas zonas consideradas más críticas (superficie no inspeccionada existente entre el borde de la bobina, punto 1 figura 7.10b, y el siguiente paso del movimiento de barrido por el mismo borde, punto 2).

Ambos movimientos han de ser tenidos en cuenta en lo que respecta al *tiempo de exposición* uno de los requisitos más importantes de sistemas de visión que analizan objetos en movimiento.

El tiempo de exposición es el tiempo que el sensor de la cámara está acumulando la energía lumínica procedente del exterior. Si durante este tiempo de exposición existe un movimiento relativo entre la cámara (sensor) y el objeto bajo inspección se producirá un efecto de difuminado con la consecuente pérdida de nitidez en la imagen.

El grado de difuminación o borrosidad de la imagen dependerá de la velocidad relativa objeto-cámara V_{OC} y del tiempo de exposición t_{exp} seleccionado para la adquisición siendo el efecto más acusado cuanto mayor sea la velocidad relativa y tiempo de exposición del sensor. De esta manera, dada una velocidad relativa V_{OC} en mm/s y un tiempo de exposición t_{exp} en segundos la borrosidad b que se produce, expresada en milímetros, es:

$$b = V_{OC} \cdot t_{exp} \quad (7.8)$$

A partir de la resolución espacial R_s en la dirección i del movimiento relativo se puede trasladar b al sensor de la cámara obteniendo la borrosidad b_{px} en píxeles:

$$b_{px} = \frac{b}{R_{s_i}} = \frac{V_{OC} \cdot t_{exp}}{FOV_i / R_{c_i}} \quad (7.9)$$

siendo FOV_i y R_{c_i} el campo de visión en milímetros y la resolución de la cámara en píxeles en la dirección i (que podría coincidir o no con alguna de las direcciones principales del sensor, es decir, horizontal o vertical).

Aunque la borrosidad máxima tolerable para una imagen dependerá de cada tarea de visión suele considerarse, como primera aproximación, una borrosidad máxima de un píxel ($b_{px} = 1 \text{ px}$). Aplicando este valor en la ecuación 7.9 se obtiene el valor del tiempo de exposición que cumple con la restricción de borrosidad máxima de un píxel:

$$t_{exp} \leq \frac{FOV_i}{V_{OC} \cdot R_{c_i}} \quad (7.10)$$

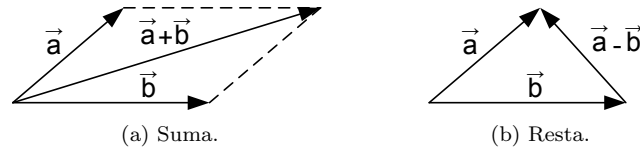


Figura 7.11: Suma y resta de vectores.

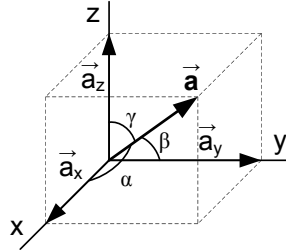


Figura 7.12: Componentes de un vector.

Volviendo de nuevo a la figura 7.10b, en la que se mostraba el muestreo de la superficie aplicando un movimiento de barrido horizontal \vec{V}_h , calcularemos la velocidad relativa de la superficie de la banda respecto a la cámara \vec{V}_{vh} así como su dirección i tomando como origen del sistema de coordenadas la propia cámara.

Para poder realizar la suma o resta de dos vectores \vec{a} y \vec{b} lo más habitual es hacerlo como suma (figura 7.11a) o resta (figura 7.11b) vectorial a partir de las componentes unitarias que forman la base vectorial.

Considerando un sistema tridimensional formado por los ejes ortogonales x , y y z podemos definir unas componentes unitarias \vec{i} , \vec{j} y \vec{k} respectivamente para cada eje y expresar un determinado vector \vec{a} en función de éstas (figura 7.12). Así, la descomposición de los vectores \vec{a} y \vec{b} quedaría:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} + a_z \cdot \vec{k} \\ \vec{b} &= b_x \cdot \vec{i} + b_y \cdot \vec{j} + b_z \cdot \vec{k}\end{aligned}\quad (7.11)$$

Sumando o restando estos vectores se obtiene la resultante $\vec{R}_{a \pm b}$ cuyo módulo es $|\vec{R}_{a \pm b}|$:

$$\vec{R}_{a \pm b} = \vec{a} \pm \vec{b} = (a_x \pm b_x) \cdot \vec{i} + (a_y \pm b_y) \cdot \vec{j} + (a_z \pm b_z) \cdot \vec{k} \quad (7.12)$$

$$|\vec{R}_{a \pm b}| = \sqrt{(a_x \pm b_x)^2 + (a_y \pm b_y)^2 + (a_z \pm b_z)^2} \quad (7.13)$$

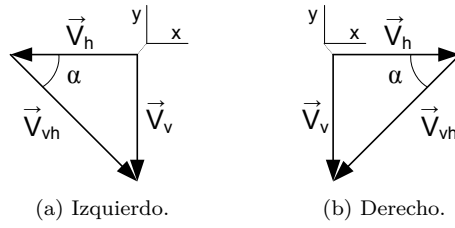


Figura 7.13: Resultante de la velocidad relativa.

y los valores de los ángulos directores α , β y γ formados entre la resultante y cada uno de los ejes:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{a_x \pm b_x}{|\vec{R}_{a \pm b}|} \right) \quad (7.14)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{a_y \pm b_y}{|\vec{R}_{a \pm b}|} \right) \quad (7.15)$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{a_z \pm b_z}{|\vec{R}_{a \pm b}|} \right) \quad (7.16)$$

La velocidad relativa \vec{V}_{vh} se obtiene a partir de la diferencia entre el vector \vec{V}_v y el \vec{V}_h (ecuación 7.17). Gráficamente, la velocidad relativa \vec{V}_{vh} queda representada en la figura 7.13 según sea el movimiento de barrido horizontal en sentido hacia la izquierda o la derecha.

Para su cálculo, consideraremos que \vec{V}_h y \vec{V}_v forman entre sí un ángulo de 90° , que ambos vectores están alineados respectivamente con los ejes x e y , y que los vectores no tienen componente en el eje z reduciéndose el problema a un sistema de dos dimensiones.

$$\vec{V}_{vh} = \vec{V}_v - \vec{V}_h = V_h \cdot \vec{i} + V_v \cdot \vec{j} \quad (7.17)$$

El módulo será:

$$|\vec{V}_{vh}| = \sqrt{V_h^2 + V_v^2} \quad (7.18)$$

V_h (mm/s)	V_v (m/min)	$ \vec{V}_{vh} $ (mm/s)	α (°)
400	6	412	14
400	60	1077	68

Tabla 7.1: Variación del módulo y ángulo de la resultante.

Al reducir el problema a dos dimensiones, el cálculo del ángulo formado por la velocidad relativa \vec{V}_{vh} se simplifica pudiéndolo tomar respecto al eje x o y. Para el caso del ángulo α formado entre \vec{V}_{vh} y el eje x se tiene:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_v}{V_h}\right) \quad (7.19)$$

Sabiendo que el rango de velocidades de línea es $V_v = [6, 60]$ m/min y que se añade un barrido horizontal $V_h = 400$ mm/s. Aplicando las ecuaciones para el cálculo del módulo y el ángulo de la resultante \vec{V}_{vh} (ecuaciones 7.18 y 7.19) se obtienen los resultados de la tabla 7.1.

Para el cálculo del tiempo de exposición se podría considerar el caso peor, tomar el valor máximo del módulo de la velocidad relativa ($|\vec{V}_{vh}| = 1077$ mm/s) y considerar el FOV y la resolución de la cámara R_c en la dirección i (68°), o bien, establecer un criterio menos rígido tomando un compromiso intermedio: $|\vec{V}_{vh}| \approx 700$ mm/s y $\alpha \approx 45^\circ$.

Si nos decidimos por éste último y consideramos que en la dirección $\alpha = 45^\circ$ se tiene un $FOV_i = 40$ mm y una $R_{ci} = 1600$ px, aplicando la ecuación 7.10 obtenemos la siguiente condición para el tiempo de exposición:

$$t_{exp} \leq \frac{FOV_i}{V_{vh} \cdot R_{ci}} = \frac{40}{700 \cdot 1600} \approx 35 \mu s \quad (7.20)$$

7.2.7 Requerimientos de funcionamiento.

Precisión.

De común acuerdo con el personal del departamento de calidad de Acerinox Europa, S.A.U. se establece que el tamaño mínimo de la mancha de óxido residual a detectar por el sistema es de $50\text{ }\mu\text{m}$.

Tiempo.

El sistema de inspección no va a realizar una *inspección total* de la superficie de la bobina. La cantidad de elementos hardware y software que se requerirían para una inspección completa de la bobina sería elevado haciendo un sistema difícil de justificar desde el punto de vista económico.

Así, un *sistema basado en la toma de muestras de la superficie* puede ser una buena solución para inferir la calidad de la bobina puesto que simplifica la complejidad del sistema, agiliza la adquisición y el tratamiento de datos y abarata los costes de diseño, desarrollo y mantenimiento del sistema.

La fiabilidad de los resultados dependerá de que las muestras sean *representativas* de la superficie total de la bobina y se hayan adquirido de manera *aleatoria*. La *técnica de muestreo* empleada será un *muestreo aleatorio simple* donde se estima que cualquier parte de la superficie de la bobina tiene la misma probabilidad de ser escogida como muestra [373, 374].

Cosiderando que en una muestra de superficie inspeccionada solamente pueden darse dos sucesos, muestra limpia de manchas (suceso A) o con manchas de óxido residual (suceso \bar{A}), la probabilidad de ocurrencia de cada suceso será $P(A) = p$ y $P(\bar{A}) = q$ cumpliéndose que $P(A) + P(\bar{A}) = 1$.

Si todos los experimentos n (o inspecciones) son independientes entre sí con una probabilidad fija p , la distribución de probabilidad sigue una ley binomial. Si además se cumple la desigualdad $n \cdot p \cdot q > 9$, la distribución binomial se aproximará a una distribución normal pudiéndose aplicar esta última simplificando cualquier cálculo que se realice.

Una vez sentadas las bases del muestreo, se desea obtener el *número de muestras mínimo* n_{\min} que han de tomarse para obtener en los resultados una fiabilidad y exactitud determinadas. Para ello, se aplican una serie de criterios cuyos valores son establecidos empíricamente por el investigador:

- Intervalo fiable o nivel de confianza deseado $1 - \alpha$, expresado en tanto por uno. Su valor corresponderá con la probabilidad de que los resultados sean ciertos (por ejemplo el 95 %).
- Error muestral deseado γ en la evaluación (1 %). Diferencia entre el resultado que se obtiene con un muestreo de la superficie y el que se obtendría inspeccionando la superficie completa.
- Probabilidad p aproximada de que en el número total de muestreos se de el suceso A (95 %). Consideraremos que en el 95 % de las inspecciones realizadas sobre una bobina no se detectarán manchas de óxido.

- Se va a considerar la población total N como el número de veces que el sistema de inspección tendría que muestrear la superficie total de una bobina estándar para cubrir toda su superficie S_t considerando como tal una bobina de 1000 m de longitud y 1500 mm de ancho. Si el sistema de inspección es capaz de inspeccionar una superficie S_i de 24×32 mm en cada inspección individual se tiene:

$$N = \frac{S_t}{S_i} \approx 1953125 \quad (7.21)$$

Así, el valor n_{\min} de una proporción para un muestreo aleatorio simple considerando una población finita vendrá definido como [375, 376]:

$$n_{\min} \geq \frac{Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{(N-1) \cdot \gamma^2 + Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \cdot p \cdot q} \quad (7.22)$$

donde $Z_{\frac{\alpha}{2}}$, denominado valor crítico, es el valor de la abscisa de la curva tipificada de la distribución normal que se corresponde con un valor de probabilidad $1 - \frac{\alpha}{2}$. Si se busca el valor $\alpha/2 = 0,975$ en una tabla de distribución normal tipificada (ver figura E.1 en apéndice E) se obtiene un valor de 1,96. Aplicando los valores establecidos en la ecuación 7.22 se obtiene:

$$n_{\min} \geq \frac{1,96^2 \cdot 0,95 \cdot 0,05 \cdot 1953125}{(1953125-1) \cdot 0,01^2 + 1,96^2 \cdot 0,95 \cdot 0,05} \approx 1823 \quad (7.23)$$

Por tanto, para obtener la fiabilidad y exactitud establecidas se necesitarán realizar al menos 1823 muestreos de la superficie de la bobina.

Suponiendo que una bobina estándar, de longitud y espesor intermedios, se procesa en unos 30 minutos (1800 segundos) el ritmo de adquisición de las muestras deberá ser aproximadamente de una muestra por segundo ($\frac{1823}{1800} = 1,01$ muestras/s).

7.2.8 Interfaces de información.

Uno de los factores más importantes para el éxito de un sistema de visión es su integración dentro del proceso de información de la factoría. Esta integración puede entenderse como la transferencia de datos entre el sistema de visión y los sistemas que le rodean.

Para el sistema de detección de óxido residual, su integración dentro del sistema de información de la factoría es además una necesidad ya que permitirá recabar una información completa, íntegra y fiable. Ésta se analizará en una fase posterior y se extrapolarán los resultados sirviendo de base para verificar la metodología propuesta objeto de la presente tesis.

Los datos *tipos de datos* que se intercambiarán son los siguientes:

- *Datos y señales de control y estado:*
 - Puesta en operación y detención del sistema.
 - Comienzo y finalización de la inspección de una bobina.
 - Señales de control de la cámara para el proceso de adquisición de imágenes.
 - Sincronización con el sistema de iluminación.
 - Velocidad y metraje de la banda.
 - Estado del sistema de visión (tipo de operación, posición, errores, etc.).
 - Estado de la línea de producción (en operación o parada, funcionamiento normal o anómalo, etc.).
- *Parámetros y resultados:*
 - Características de la bobina inspeccionada (tipo de acero, acabado superficial, espesor, ancho, longitud, etc.).
 - Parámetros del proceso de producción (normas de recocido: velocidades, temperatura, etc.).
 - Configuración y calibración del sistema de inspección automatizada: cámara, sistema de iluminación, automatismo, etc.
 - Resultados de inspección del operador de control de calidad: cuantificación y cualificación de las manchas de óxido.
 - Resultados del sistema de inspección automatizada: estadísticas de inspección.
- *Datos en masa:*
 - Imágenes reales de la superficie inspeccionada.
 - Imágenes resultado del procesamiento de imagen.

7.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.

La información obtenida durante la especificación del sistema va a ser clave durante la realización de la etapa de diseño. El objetivo principal de esta etapa es la determinación de aquellos parámetros y variables necesarios para la elección y dimensionado de los elementos que componen el sistema de visión como paso previo a su implementación.

Los aspectos relativos al diseño del sistema que se exponen a continuación se limitan exclusivamente a aquellos necesarios para el proceso de adquisición de imágenes y son los siguientes:

- Tipo de cámara.
- Resolución.
- Óptica del sistema.
- Consideraciones sobre elementos hardware.
- Sistema de iluminación.

7.3.1 Tipo de cámara.

La elección del tipo de cámara más adecuada a la tarea de visión propuesta va a basarse en el procedimiento mostrado en el diagrama de flujo presentado en el capítulo 2 (figura 3.3) para la selección de una cámara de inspección superficial.

En lo que respecta a este diagrama la detección de óxido residual va a tener las siguientes características:

- La superficie a inspeccionar (banda de acero) se desplaza a lo largo de la línea de producción en un *movimiento continuo*.
- No hay ninguna interrupción de la banda por lo que se dispone de una *superficie continua*.
- Respecto al tipo de inspección, éste está basado en un *muestreo* de la superficie. No se va a realizar una inspección total de la bobina.

Atendiendo a estos criterios y siguiendo la secuencia del diagrama de flujo para la selección de cámaras (figura 3.3 en sección 3.2 del capítulo 3), *el tipo de cámara adecuado para la detección de óxido será una cámara de área progresiva*.

En cuanto a la tecnología empleada por el sensor, *se utilizará un sensor CCD* ya que tiene una muy buena relación señal/ruido y sensibilidad resultando ser unas características bastante atractivas para la inspección de una superficie en movimiento.

7.3.2 Resolución.

De común acuerdo con el fabricante de acero inoxidable se determina que el tamaño mínimo detectable de una mancha de óxido residual, S_f ha de estar comprendido dentro del rango $0,05 \leq S_f \leq 0,1$ mm.

Además, se considera que en las imágenes adquiridas haya al menos cuatro píxeles por mancha en una disposición espacial de 2×2 píxeles (figura 7.14a). Ésto se corresponde con un valor de precisión esperada en la medida de $N_f = 2$ píxeles, aunque se podría ser un poco más restrictivo y considerar un valor $N_f = 3$ para un algoritmo de reconocimiento de regiones (ver tabla 3.3 en sección 3.2 del capítulo 3).

Aplicando la ecuación 3.4 se obtiene la resolución espacial necesaria R_s para el tamaño de mancha más pequeña ($S_f = 0,05$ mm):

$$R_s = \frac{S_f}{N_f} = \frac{0,05 \text{ mm}}{2 \text{ px}} = 0,025 \text{ mm/píxel} \quad (7.24)$$

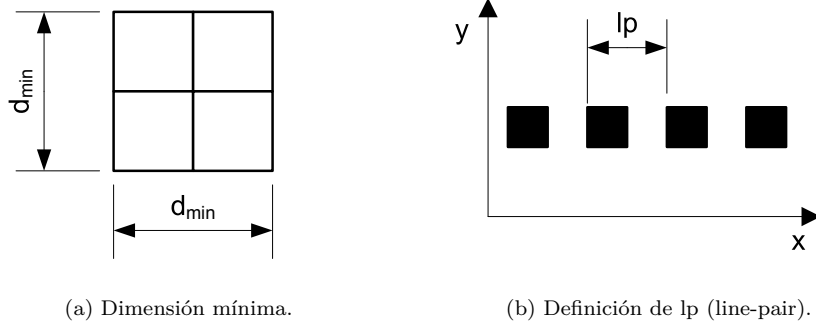


Figura 7.14: Dimensión y resolución de una mancha de óxido.

La resolución espacial se puede expresar en otra unidad más apropiada para la selección la óptica de la cámara: el *poder resolutivo de la lente* R_L expresado en pares de líneas por milímetro (lp/mm). Para ello se considerará que las manchas están distribuidas a lo largo de un eje paralelo a uno de los ejes de la imagen, con una separación entre manchas igual a su tamaño (figura 7.14b).

La resolución espacial R_s^* que se obtiene para la mancha de óxido, expresada en lp/mm, es la siguiente:

$$R_s^* = \frac{N_f}{2 \cdot S_f} = \frac{2}{2 \cdot 0,05} = 20 \text{ lp/mm} \quad (7.25)$$

Una vez determinada la resolución espacial del sistema R_s (o R_s^*) necesitaremos conocer la resolución mínima que deberá tener el sensor de la cámara para poder representar la mancha con fidelidad.

El *teorema del muestreo de Shannon* dice que una imagen (limitada en frecuencia espacial) podrá ser representada (y reconstruida) con fidelidad si la imagen se muestrea al doble de la frecuencia espacial más grande presente en la imagen. Esta frecuencia de muestreo se suele denominar frecuencia límite de Nyquist [183] y su valor inverso es la resolución espacial R_{Nyq} , expresada en lp/mm , que es función de la distancia d_{px} existente entre los píxeles del sensor de la cámara:

$$R_{Nyq} = \frac{1}{2 \cdot d_{px}} \quad (7.26)$$

Considerando la frecuencia límite de Nyquist, la resolución de la cámara Rc_i^* en la dirección i (horizontal o vertical), expresada en lp/mm , será función de la resolución de la cámara Rc_i , expresada en píxeles, y del tamaño del sensor Ss_i en milímetros (ecuación 7.27).

$$Rc_i^* = \frac{Rc_i}{2 \cdot Ss_i} \quad (7.27)$$

Si el píxel es cuadrado y la distancia entre píxeles es la misma en ambas direcciones el cálculo de la resolución de la cámara se puede aplicar indistintamente sobre cualquiera de las direcciones principales del sensor (horizontal o vertical). En caso contrario, tendremos resoluciones distintas en cada dirección.

Ambas resoluciones Rs y Rc se relacionan entre sí a través del valor de la magnificación primaria β que se define como la relación dimensional existente entre el plano del objeto (superficie de inspección) y el plano de la imagen (sensor de la cámara). Por tanto, *en la elección de la cámara tendrá que cumplirse:*

$$Rc \geq \frac{Rs}{\beta} \quad (7.28)$$

7.3.3 Óptica del sistema.

Básicamente, la óptica del sistema debe estar de acorde con el tipo y resolución de la cámara R_c que se selecciona, con la distancia cámara-superficie del objeto y con el sistema de iluminación seleccionado, sin olvidar, las restricciones que van a venir impuestas por las condiciones reales de operación durante el proceso de detección de manchas de óxido residual.

En esta sección se tendrán en cuenta aspectos fundamentales sobre la óptica del sistema que ayudarán a fijar las características básicas de la imágenes que van a ser adquiridas. De hecho, la importancia de ciertos aspectos serán determinantes en etapas posteriores del problema de la detección.

Se van a imponer una serie de *especificaciones* para la selección de la óptica:

- Se utilizarán *distancias focales* correspondientes con ópticas estándar del mercado.
- El valor de la *profundidad de campo* DOF debe maximizarse sin perder calidad en la imagen. Si es lo suficientemente grande permitirá inspeccionar todo el rango de espesores y posibles desplazamientos de la banda a lo largo del eje óptico de la cámara.
- El *área o superficie inspeccionada* ha de ser máxima. De esta manera los resultados del análisis de inspección para la detección de óxido serán, estadísticamente hablando, más robustos y fiables.
- La *resolución de la cámara R_c* ha de ser lo más pequeña posible. A menor resolución de la cámara menor será el coste computacional durante el procesamiento y menor el coste económico de la cámara.

Las definiciones y ecuaciones básicas realizadas en esta sección están fundamentadas en información extraída de [377, 378, 66, 379, 109, 178, 1, 380].

Distancia focal y magnificación.

Una vez determinada la resolución del sistema R_s e impuesta la condición que ha de cumplirse para la elección de la resolución de la cámara R_c , se necesitarán conocer otros aspectos como son la magnificación primaria β , la distancia focal f y el área o tamaño de la superficie que se quiere inspeccionar S_i .

Consideremos los distintos elementos que componen el modelo de lente delgada (figura 7.15) donde el espesor de la lente es muy pequeño comparado con el radio de la lente. Las propiedades básicas de la lente delgada fueron establecidas por Johann Carl Friedrich Gauss y son las siguientes:

- Cualquier rayo que entre en la lente paralelo al eje óptico atravesará el foco en el otro lado de la lente.
- Cualquier rayo que pase por el foco de uno de los lados de la lente saldrá paralelo al eje óptico por el otro lado de la lente.
- Cualquier rayo que atraviese el centro de la lente no altera su trayectoria.

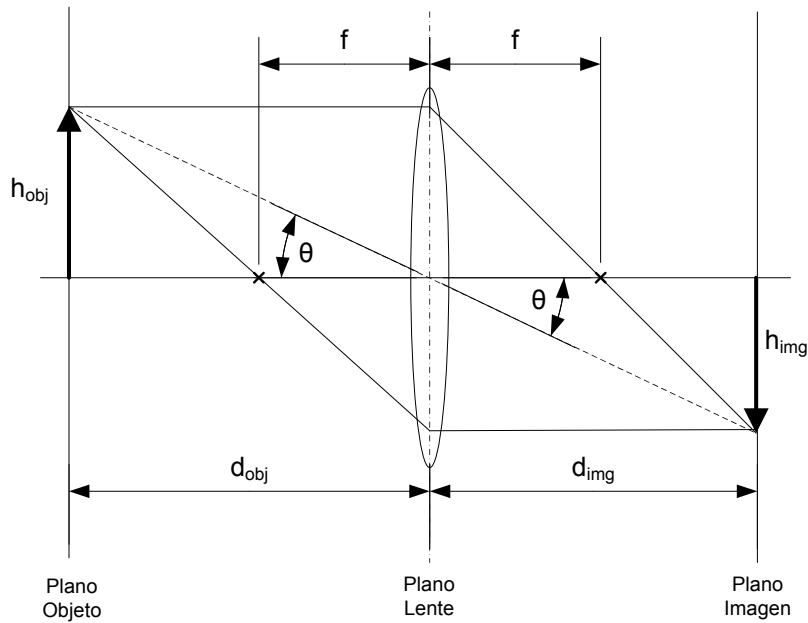


Figura 7.15: Modelo de lente delgada.

Al trabajar con lentes delgadas convergentes se puede admitir que los planos principales de la lente coinciden en uno solo (plano lente) debido a que las dos focales son iguales y de signo contrario.

Fijaremos el centro óptico de la lente como el origen del eje de coordenadas del sistema de referencia. Según el modelo de lente delgada tenemos la ecuación 7.29.

$$\frac{1}{d_{\text{obj}}} + \frac{1}{d_{\text{img}}} = \frac{1}{f} \quad (7.29)$$

donde

- f distancia focal (en mm)
- d_{obj} distancia entre la lente y el plano objeto (en mm)
- d_{img} distancia entre la lente y el plano imagen (en mm)

De la figura 7.15 se puede extraer la siguiente relación:

$$\tan \theta = \frac{h_{\text{img}}}{d_{\text{img}}} = \frac{h_{\text{obj}}}{d_{\text{obj}}} \quad (7.30)$$

$$d_{\text{img}} = d_{\text{obj}} \cdot \frac{h_{\text{img}}}{h_{\text{obj}}} \quad (7.31)$$

f	β	$[Rc^*]_{\min} = Rs^*/\beta$
6	0,0204	980
8	0,0274	730
12	0,0417	480
16	0,0563	355
25	0,0909	220
35	0,1321	151
50	0,2000	100
75	0,3333	60
100	0,5000	40

Tabla 7.2: Magnificación y resolución mínima ($Rs^*=20$ lp/mm).

La magnificación primaria β es la relación entre el tamaño del objeto h_{obj} y el tamaño del objeto en el plano de la imagen h_{img} (ecuación 7.32) y dependerá, básicamente, de la característica de la óptica y la distancia al objeto

$$\beta = \frac{h_{img}}{h_{obj}} \quad (7.32)$$

que también puede escribirse como

$$\beta = \frac{d_{img}}{d_{obj}} \quad (7.33)$$

Introduciendo el cambio de la ecuación 7.32 en la ecuación 7.31 y sustituyendo esta última en la ecuación 7.29 obtenemos la ecuación 7.34.

$$\beta = \frac{f}{d_{obj} - f} \quad (7.34)$$

La tabla 7.2 muestra los resultados obtenidos de la magnificación primaria β según una serie de distancias focales f para una distancia $d_{obj} = 300$ mm. Las dos columnas finales se corresponderán con la resolución mínima de la cámara (ecuación 7.28), en lp/mm, que se necesitará para conseguir una determinada resolución del sistema Rs^* .

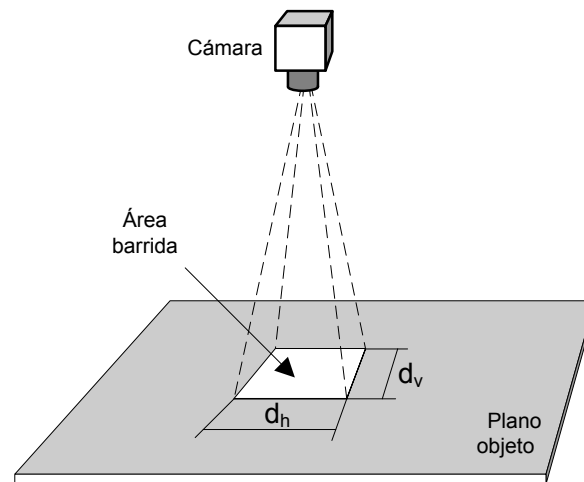


Figura 7.16: Dimensiones máximas barridas en el plano objeto.

Campo de visión.

Interesará muestrear el máximo posible de superficie siempre que se alcance la resolución espacial requerida para la detección del tamaño mínimo detectable de mancha de óxido residual, Sf.

Si se considera una cámara de formato intermedio que tiene una resolución horizontal del sensor de la cámara Rc_h de 1380 px, una resolución vertical Rc_v de 1035 px, píxeles cuadrados de tamaño $t_{px} = 4,65 \mu m$ y un tamaño de sensor $Ss_h = 6,4 mm$ y $Ss_v = 4,8 mm$. Aplicando la ecuación 7.27 se obtendrá la siguiente resolución de la cámara:

$$Rc^* = \frac{Rc}{2 \cdot Ss} = \frac{1380 px}{2 \cdot 6,4 mm} = 107,81 lp/mm \quad (7.35)$$

Observando la tabla 7.2 para la resolución de cámara obtenida, se seleccionará la óptica de distancia focal $f = 50 mm$ cuya magnificación primaria es $\beta = 0,2$.

La resolución efectiva del sistema, Rs_e^* , será la siguiente:

$$Rs_e^* = \beta \cdot Rc^* = 0,200 \cdot 107,81 = 21,56 lp/mm \quad (7.36)$$

La dimensión de la superficie barrida por la cámara mostrada en la figura 7.16 es $S_i = d_h \times d_v$. Aplicando las ecuaciones 7.37 y 7.38 obtendremos los resultados de la tabla 7.3.

		FOV	
f	β	d_h	d_v
50	0,2000	32	24

Tabla 7.3: Dimensiones del área barrida por la cámara (en mm).

$$d_h = \frac{Ss_h}{\beta} \quad (7.37)$$

$$d_v = \frac{Ss_v}{\beta} \quad (7.38)$$

En el caso particular de utilizar una cámara digital con salida analógica se necesitará una tarjeta capturadora (o frame grabber) para digitalizar la señal. Si la resolución de la cámara Rc_i y de la tarjeta capturadora Rf_i son diferentes la magnificación total β_T obtenida será:

$$\beta_T = \beta \cdot \frac{Rf_i}{Rc_i} \quad (7.39)$$

Profundidad de campo.

La profundidad de campo DOF es el rango de distancias en el que cualquier objeto, ubicado dentro de este rango, aparece enfocado en el plano de la imagen. La profundidad de campo es función de la resolución del sensor de la cámara, de la apertura del diafragma o iris \emptyset y de la distancia entre la lente y el objeto d_{obj} .

Cuando se actúa sobre el diafragma se modifican las dimensiones de la apertura lo que produce una variación de la cantidad de luz que incide sobre el sensor de la imagen. La apertura afectará directamente a la profundidad de campo (figura 7.17): cuanto más abierta esté menor será la profundidad de campo y viceversa.

Este hecho se debe al fenómeno de colimación de la luz, por el cual, los rayos que atraviesan una abertura pequeña se encuentran más alineados que aquellos que lo hacen por una grande obteniéndose una imagen más nítida a distancias más alejadas del punto focal.

Para calcular la profundidad de campo será necesario introducir un parámetro adimensional denominado número-F (representado también como $f/\#$) que se define como la relación entre la distancia focal f y el diámetro \emptyset de la apertura del diafragma expresado en mm (ecuación 7.40).

$$(f/\#) = \frac{f}{\emptyset} \quad (7.40)$$

De esta manera, una lente con distancia focal 50 mm y diámetro de la apertura 9 mm tendrá un valor para el número-F de 5.6 (representado también como F5.6 ó $f/5.6$). La escala del número-F está normalizada en los valores 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32, etc. (puede observarse que cada incremento del número-F respecto al anterior viene multiplicado por $\sqrt{2}$). Cada incremento del número-F en la secuencia normalizada equivale a una reducción a la mitad de la cantidad de luz que incide en el sensor.

En general, la forma más exacta de calcular la profundidad de campo es hacerlo de manera práctica utilizando una serie de plantillas especiales para calibración pero se puede conseguir una buena aproximación realizando una serie de cálculos teóricos asumiendo que los rayos que alcanzan la lente forman un ángulo muy pequeño, $\cos \theta \approx 1$, respecto al eje óptico (aproximación paraxial).

Si se considera que el límite de desenfoque máximo a tolerar es el tamaño de un píxel de la cámara, t_{px} , un punto del espacio en el plano objeto permanecerá enfocado en el plano imagen siempre que los rayos procedentes del punto incidan en un único píxel de la imagen ([66]).

Basándose en la figura 7.17 y aplicando el modelo de lente delgada se tienen las siguientes ecuaciones 7.41 y 7.42:

$$\frac{1}{d_F} + \frac{1}{d_{F'}} = \frac{1}{f} \quad (7.41)$$

$$\frac{1}{d_N} + \frac{1}{d_{N'}} = \frac{1}{f} \quad (7.42)$$

donde

- d_F distancia entre la lente y el punto de enfoque más lejano (en mm)
- $d_{F'}$ distancia correspondiente a d_F en el plano imagen (en mm)
- d_N distancia entre la lente y el punto de enfoque más cercano (en mm)
- $d_{N'}$ distancia correspondiente a d_N en el plano imagen (en mm)

Despejando en ambas ecuaciones $d_{F'}$ y $d_{N'}$ se tiene:

$$d_{F'} = \frac{f \cdot d_F}{d_F - f} \quad (7.43)$$

$$d_{N'} = \frac{f \cdot d_N}{d_N - f} \quad (7.44)$$

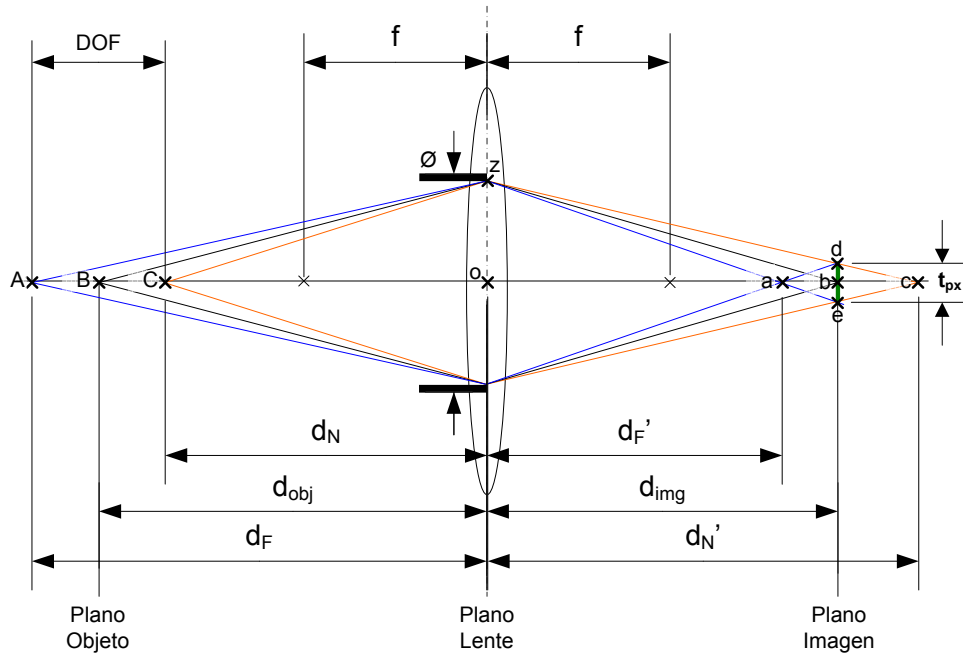


Figura 7.17: Profundidad de campo.

Aplicando semejanza entre los triángulos $\triangle a b e$ y $\triangle a o z$ y entre los triángulos $\triangle c d b$ y $\triangle c o z$ se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{t_{px}/2}{d_{N'} - d_{img}} = \frac{\phi/2}{d_{N'}} \quad (7.45)$$

$$\frac{t_{px}/2}{d_{img} - d_{F'}} = \frac{\phi/2}{d_{F'}} \quad (7.46)$$

Introduciendo en las ecuaciones 7.45 y 7.46 el cambio de variable de la ecuación 7.40 y despejando $d_{F'}$ y $d_{N'}$ se obtiene:

$$d_{F'} = \frac{f \cdot d_{img}}{f + (f/\#) \cdot t_{px}} \quad (7.47)$$

$$d_{N'} = \frac{f \cdot d_{img}}{f - (f/\#) \cdot t_{px}} \quad (7.48)$$

(f/#)	DOF	(f/#)	DOF
1,4	0,39	16	4,46
2	0,55	22	6,13
2,8	0,78	32	8,93
4	1,11	45	12,56
5,6	1,56	64	17,87
8	2,23	90	25,15
11	3,07	128	35,84

Tabla 7.4: Profundidad de campo teórica calculada para $f = 50$ mm.

Se necesita una última ecuación para poder tener todas las ecuaciones definidas con parámetros de diseño conocidos. De la ecuación 7.15 se obtiene el valor de d_{img} en función de la distancia focal, f , y de la distancia al objeto d_{obj} :

$$d_{\text{img}} = \frac{f \cdot d_{\text{obj}}}{d_{\text{obj}} - f} \quad (7.49)$$

Sustituyendo d_{img} de la ecuación 7.31 en las ecuaciones 7.47 y 7.48 e igualándolas a las ecuaciones 7.43 y 7.44, se obtienen los valores de la distancia de enfoque más lejana d_F y cercana d_N respectivamente.

$$d_F = \frac{f^2 \cdot d_{\text{obj}}}{f^2 + (f/\#) \cdot t_{\text{px}} \cdot (f - d_{\text{obj}})} \quad (7.50)$$

$$d_N = \frac{f^2 \cdot d_{\text{obj}}}{f^2 - (f/\#) \cdot t_{\text{px}} \cdot (f - d_{\text{obj}})} \quad (7.51)$$

El valor teórico de la profundidad de campo será la diferencia entre las distancias d_F y d_N ($\text{DOF} = d_F - d_N$). Aplicando el valor de los parámetros ya vistos con anterioridad para la distancia focal $f = 50$ mm y un tamaño de píxel $t_{\text{px}} = 4,65 \mu\text{m}$ se obtienen los resultados mostrados en la tabla 7.4.

Se observa que conforme aumenta el valor del número-F ($f/\#$), equivalente a una disminución del diámetro de la apertura del diafragma \varnothing manteniendo la distancia focal f constante, la profundidad de campo DOF aumenta. Pero el valor máximo que se puede obtener para el DOF, manteniendo la nitidez en la imagen estará limitado por los fenómenos de aberración y difracción.

Aunque se utilicen ópticas de calidad en las que el fenómeno de la distorsión está bastante corregido y es prácticamente despreciable, la difracción siempre aparece deteriorando progresivamente la calidad de la imagen conforme aumenta el número-F.

Por tanto, resultaría de gran interés determinar el valor máximo teórico del número-F que se podría seleccionar aplicando un determinado criterio de calidad de la imagen. Este valor determinaría el máximo DOF que se podría alcanzar sin comprometer la calidad. Los cálculos se van a realizar a partir del concepto de difracción.

La difracción provoca que un punto del espacio, que queda perfectamente enfocado en el plano imagen del sensor de la cámara, no aparezca como un punto sino como un disco rodeado por una secuencia de anillos concéntricos claros y oscuros denominado *patrón de Airy*⁶[381]. El disco central del patrón de Airy se denomina *disco de Airy* y su radio r_{Airy} viene determinado por la siguiente ecuación:

$$r_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{d_{\text{img}}}{\phi} \quad (7.52)$$

donde λ es la longitud de onda, d_{img} es la distancia desde la lente hasta el plano imagen y ϕ es el diámetro de la apertura de la lente. Introduciendo la ecuación 7.40 en la ecuación 7.52 se tiene:

$$r_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{(f/\#) \cdot d_{\text{img}}}{f} \quad (7.53)$$

La ecuación 7.29 del modelo de la lente se puede poner en función de la magnificación primaria $\beta = d_{\text{img}}/d_{\text{obj}}$ (ecuación 7.33) y despejando posteriormente d_{img} queda:

$$d_{\text{img}} = f \cdot (1 + \beta) \quad (7.54)$$

Sustituyendo d_{img} de la ecuación 7.54 en 7.52 se obtiene el valor del radio del *disco de Airy* en función del número-F y la magnificación primaria:

$$r_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \lambda \cdot (f/\#) \cdot (1 + \beta) \quad (7.55)$$

Una vez conocido r_{Airy} se puede aplicar alguno de los criterios de calidad de imagen basados en la capacidad resolutive de un sistema. Aunque su uso más adecuado es en la percepción visual de telescopios, el *criterio de Rayleigh*⁷ [382] suele emplearse también en cámaras de visión. Este criterio, de carácter empírico, dice lo siguiente:

Dos discos de Airy pueden distinguirse cuando se encuentran separados por un radio.

Es decir, la capacidad resolutive de una lente limitada exclusivamente por la difracción dependerá de la distancia de separación entre dos discos de Airy formados en el plano imagen del sensor. Según el criterio de Rayleigh, para que ambos discos puedan distinguirse esta distancia de separación ha de ser r_{Airy} .

6 Sir George Biddel Airy (1801-1892), astrónomo británico que en 1835 describió matemáticamente este patrón.

7 John William Strutt tercer barón de Rayleigh (1842-1919) premio Nóbel en física en 1904.

Por otro lado, para evitar el fenómeno *aliasing* en un sensor monocromo se necesitará realizar al menos dos muestreos por cada diámetro del disco de Airy [383]. Esto indica que el espaciado entre píxeles del sensor d_{px} ha de cumplir $d_{px} \leq r_{Airy}$.

Para la obtención del valor de r_{Airy} es necesario asignar un valor a la longitud de onda λ . En el caso particular de la luz visible, que agrupa una serie de longitudes de onda en un rango aproximado entre 400 y 700 nm, es práctica común utilizar un valor de $\lambda = 546 \text{ nm}$ que coincide aproximadamente con el límite entre los colores verde y amarillo del espectro [384].

Teniendo en cuenta estas consideraciones sobre la ecuación 7.55 se puede obtener el valor teórico máximo del número-F seleccionable para la óptica:

$$(f/\#)_{\max} = \frac{d_{px}}{666,12 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + \beta)} \quad (7.56)$$

Aplicando los valores ya conocidos ($\beta = 0,2$ y $t_{px} = d_{px} = 4,65 \mu\text{m}$) se obtiene un valor $(f/\#)_{\max} = 5,81$. A partir de este resultado se selecciona el valor $(f/\#) = 5,6$ en la tabla 7.4 que se corresponde con una $\text{DOF} = 1,6 \text{ mm}$.

Por otro lado, en el caso de que la inspección de la banda se realice sobre un tensor es necesario verificar si la variación de la distancia cámara-objeto producida por la curvatura del tensor se encuentra dentro del rango de la profundidad de campo obtenida para el valor del número-F seleccionado.

Para el caso expuesto en 7.2.5 (tensor de radio $r = 750 \text{ mm}$ donde se inspecciona una superficie de longitud $L = 32 \text{ mm}$ a una distancia $d_{obj} = 300 \text{ mm}$) la variación máxima que se obtuvo, $y = 0,1706 \text{ mm}$, estaría dentro del rango DOF . A pesar de ello, es necesario cubrir la inspección en todo el rango de espesores de las bobinas de la línea $[0,5 - 10] \text{ mm}$ y un $\text{DOF} = 1,6 \text{ mm}$ resulta ser un valor insuficiente para cumplir con los requerimientos del sistema.

Por tanto, se necesitará dotar al sistema de inspección de un movimiento de acercamiento/alejamiento a la superficie de la bobina para poder mantener la cámara a una distancia que permita el enfoque de todo el rango de espesores.

Contraste y resolución.

Una superficie de acero inoxidable libre de óxido residual suele ser generalmente bastante homogénea y cuando se adquiere una imagen cuantizada en 255 niveles de grises su contraste se aproxima a $K \approx 50\%$ y un contraste digital de $K_{dig} \approx 100$ (ecuaciones 3.15 y 3.16 en sección 3.2.5 del capítulo 3).

La figura 7.18 muestra un histograma genérico de una imagen que podría haber sido extraído una superficie cualquiera con manchas de óxido residual. Marcado en *línea continua* puede observarse la existencia de dos grupos, la curva de mayor amplitud y nivel medio de gris se corresponde con la superficie libre de óxido y la curva de menor amplitud y nivel de gris se corresponde con aquellos píxeles que se identifican con el óxido residual. A su vez, la curva de mayor amplitud podría representar la suma de las frecuencias de dos curvas, mostradas en el dibujo en *línea discontinua*, correspondientes con los *valles* (menor nivel medio de gris) y con las *crestas* (mayor nivel medio de gris).

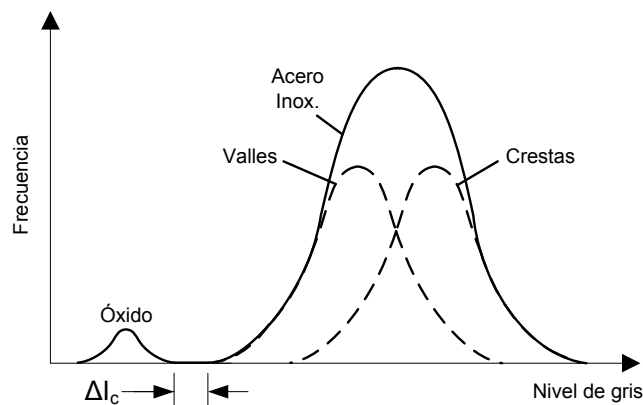


Figura 7.18: Histograma genérico de una superficie con óxido residual.

La detección de manchas de óxido va a consistir en determinar el nivel de gris adecuado que discrimine píxeles que representan óxido residual de los que no. Así, para poder garantizar una clasificación correcta el requerimiento básico será que exista cierta distancia de separación ΔI_c , considerada en niveles de grises, entre los niveles de gris de los píxeles correspondientes con el óxido y los niveles de gris de los píxeles de las zonas más oscuras de la superficie libre de óxido, es decir, los valles. *La existencia de este contraste quedó constatada y se muestra en la sección 6.3.5 del capítulo 6 correspondiente con el estudio espectrofotométrico.*

El poder resolutivo de la lente R_L se selecciona considerando un $R_L \approx R_c$. La resolución espacial R_c de la cámara se calculó aplicando la ecuación 7.27 cuyo resultado fue $R_c = 107,53$ lp/mm.

Con el valor de R_L , se buscará en los catálogos de fabricantes de ópticas aquellas lentes que, cumpliendo aproximadamente con este valor, además maximicen el MTF y la profundidad de campo DOF y minimicen los fenómenos de distorsión y difracción para la resolución del sistema obtenida $R_s = 20$ lp/mm.

7.3.4 Consideraciones sobre elementos hardware.

Una vez conocido el tipo de cámara a emplear (cámara de área CCD progresiva) y su resolución ($Rc_h = 1380\text{ px}$ y $Rc_v = 1035\text{ px}$) se puede aportar información que ayude a la selección posterior de la cámara, la tarjeta capturadora y la plataforma hardware del sistema de visión.

La información expuesta a continuación se limitará exclusivamente a aquella que pueda derivarse de la ya aportada y que resuelva cuestiones o acote el ámbito de selección de elementos hardware que integran la adquisición de imágenes.

Cámara.

Uno de los aspectos de los que hasta ahora no se ha hablado es determinar el *tipo de sensor* de la cámara: color o monocromo. Se ha de considerar si la introducción de una cámara de color aporta o no información que facilite la detección de óxido residual y, en caso afirmativo, si realmente compensa su utilización frente a una cámara monocroma.

La apariencia gris de los tipos de aceros⁸ inoxidables inspeccionados, que van desde el gris claro pasando por el plateado hasta grises intermedios, y de las manchas de óxido residual (entre gris intermedio y oscuro) hace que, de partida, una cámara con sensor de color tenga poco más que aportar que una cámara monocroma a la discriminación entre ambos.

En el capítulo 3 se mostraron diversas curvas espectrales de la reflectancia de la superficie del acero inoxidable y del óxido residual para distintas muestras y se concluyó (secciones 6.3.5 y 6.3.6) que la zona espectral más adecuada para la discriminación entre ambos tipos de superficies era la zona correspondiente con el espectro visible (380 nm y 780 nm) encontrándose la zona óptima en el entorno del color verde⁹ (a 550 nm se obtiene una reflectancia de 0,281).

La mayoría de las cámaras de visión tipo CCD o CMOS monocromas que hay en el mercado suelen tener el valor máximo de su curva de respuesta espectral en el entorno del color verde resultando de interés ya que podría proponerse una solución a la discriminación de las manchas de óxido mediante una cámara convencional.

En el caso de que realmente se quisiera trabajar en la zona de discriminación óptima (545 nm a 569 nm; ver sección 6.3.5 en capítulo 6) también se podría usar una cámara monocroma aplicando dos soluciones:

- Fijación en la cámara de un filtro monocromático para el color verde e iluminación artificial convencional con emisión espectral relativamente alta en el entorno del color verde.
- Cámara monocroma convencional e iluminación mediante fuente de luz monocromática verde.

⁸ Ver *Propiedades ópticas de los metales* en sección B.7 del apéndice B.

⁹ De acuerdo con la norma DIN 5031 el color verde, propiamente dicho, se establece en el rango 517 nm a 527 nm y un valor de 550 nm es considerado un verde amarillento (527 nm a 575 nm).

Un filtro de color en combinación con una iluminación basada en una fuente de luz blanca tiene un efecto parecido en el contraste del que tendría una cámara sin filtro de color con una fuente de luz de color. Aunque, la segunda opción es preferible, desde el punto de vista de la transmisión, ya que no reduce la radiación de la fuente de luz que sí ocurriría con el filtro [109].

Dado que en la curva espectral $\overline{R_{\text{acero}}} - \overline{R_{\text{óxido}}}$ (ver figura 6.12 en sección 6.3.5 del capítulo 6) el valor de reflectancia en el punto óptimo y los valores de reflectancia que se obtienen en el resto del espectro visible difieren relativamente poco (la diferencia máxima en la reflectancia de trabajar en el óptimo y trabajar en la peor zona del espectro visible es de 0,05) podría ser una buena aproximación la utilización de una cámara con sensor monocromo sin filtro y un sistema de iluminación artificial con emisión espectral relativamente alta en el entorno del color verde.

Tarjeta capturadora y plataforma hardware

Respecto al *ancho de banda* a considerar para el proceso de adquisición a través de una tarjeta capturadora se deberá tener en cuenta el valor de la *tasa de datos instantánea* DR_i . Para un correcto proceso de adquisición, el ancho de banda de la tarjeta capturadora deberá ser mayor al valor DR_i obtenido. Considerando la cámara con una frecuencia del píxel clock $C_{PC} = 28,63636 \text{ MHz}$, una profundidad de color de 8 bits ($N_{\text{color}} = 1 \text{ byte}$) y un número de taps $N_{\text{taps}} = 1$, se obtiene:

$$DR_i = C_{PC} \cdot N_{\text{color}} \cdot N_{\text{taps}} = 28,63636 \text{ MB/s} \quad (7.57)$$

La velocidad a la que el software va a recibir una imagen completa desde la cámara se determinará mediante la tasa de datos promedio o pixel rate PR. Considerando el frame rate obtenido anteriormente en la sección 7.2.7 (1,01 muestras/s) y una carga extra de un 20 % originada por la transferencia de la imagen desde la cámara al frame grabber, es:

$$PR = R_{c_h} \cdot R_{c_v} \cdot N_{\text{color}} \cdot fr \cdot (1 + \% \text{ carga}) = 1,7311 \text{ MB/s} \quad (7.58)$$

El valor de PR obtenido, los algoritmos de procesamiento de imagen empleados y los requerimientos de *tiempo real* impuestos ayudarán a la elección de elementos de la plataforma hardware (CPU, memoria, sistema operativo, etc.).

7.3.5 Sistema de iluminación.

Un aspecto muy importante en cualquier sistema de visión es la determinación del sistema de iluminación más adecuado para el éxito de la tarea de visión propuesta. La detección del óxido residual adherido sobre una superficie de acero inoxidable no es una excepción y, de la misma forma, deberá cumplir los objetivos básicos que cualquier sistema de iluminación (ver sección 3.2.6 en capítulo 3). De esta manera, el sistema de iluminación deberá:

- Maximizar el contraste entre la superficie de acero inoxidable y las manchas de óxido residual depositadas sobre ésta.
- Minimizar el contraste del resto de características comunes u ocasionales que puedan aparecer sobre la superficie del acero (arañazos, grietas, rugosidades, ondulaciones superficiales, manchas de agua, etc.) con el fin de evitar fallos en la detección e inconsistencia en los resultados.
- Minimizar influencias externas (cambio del tipo de acero, del acabado superficial, influencia de iluminación externa, etc.).

Una vez establecidos los objetivos básicos, el siguiente paso es *analizar la escena* para conocer todos aquellos aspectos que van a influenciar, condicionar y restringir el sistema de iluminación. Ciertos aspectos ya han sido considerados con anterioridad por lo que ya se dispone de cierto conocimiento previo.

Tras un análisis pormenorizado de la escena, el *conocimiento* que dispone *a priori* es el siguiente:

- Las superficies que se van a inspeccionar son planchas de acero inoxidable de distintos espesores, anchos, tipos y acabados superficiales.

Para los tipos de acero y acabados superficiales que se inspeccionan la reflectancia de la superficie tiene un nivel intermedio con componentes reflectiva y difusa relativamente equilibradas por lo que, en general, podría considerarse que no existe predominancia de una componente sobre otra. Los valores de reflectancia promedio del acero inoxidable obtenidos de las muestras en el rango del espectro visible suelen estar entorno a un valor $\rho \approx 0,35$ (figura 6.11a en *Estudio espectrofotométrico* 6.3, capítulo 6).

Respecto a la textura y rugosidad de la superficie, existen dos tipos de tamaño de grano (fino y grueso) distribuidos heterogéneamente sobre la superficie. Tanto en un caso como en otro, la topografía de la superficie estará formada por crestas y valles de distinta entidad siendo más acusada en aquellas superficies que contienen granos gruesos. El óxido residual tiene tendencia a quedar alojado en el interior de los valles formados.

- El área de la superficie a inspeccionar es plana.

Se han analizado los efectos de la curvatura del tensor sobre la superficie a inspeccionar observándose que eran mínimos por lo que se puede considerar la superficie plana.

- Posibilidad de aparición de alteraciones ocasionadas por defectos macroestructurales (golpes, marcas de cilindros y rodillos, huellas de refractario, grietas, marcas de cepillos, etc.) y otros (soldaduras, manchas de agua, aceite, etc.) que pueden afectar a la detección del óxido residual.

- La distancia de trabajo aproximada cámara-plancha de acero es de 300 mm que, conjuntamente con la óptica seleccionada, da como resultado un área de inspección (o campo de visión FOV) de 24×32 mm.
- Se requiere una distancia mínima de seguridad entre la superficie a inspeccionar y el sistema de iluminación superior a 100 mm para la protección de éste frente a desplazamientos de la banda de acero.
- La superficie se encuentra en movimiento.

Se desplaza a lo largo de la línea de producción en un rango de velocidades de $V_v = [6, 60] \text{ m/min}$. El sistema de inspección realiza, además, un barrido de la superficie obteniéndose una velocidad relativa cámara-superficie de $|\vec{V}_{vh}| \approx 700 \text{ mm/s}$. A partir de estos datos se ha obtenido que el tiempo de exposición necesario a fijar en la cámara para evitar la adquisición de imágenes borrosas ocasionadas por el movimiento ha de ser $t_{exp} \leq 35 \mu\text{s}$.

- La velocidad de adquisición de imágenes se ha fijado considerando un muestreo aleatorio simple. Ésta es aproximadamente 1 muestra/s.
- El rango del espectro electromagnético en el que se va a trabajar es el espectro visible. El rango óptimo de longitudes de onda para la discriminación del óxido residual se encuentra aproximadamente en la mitad del espectro visible (color verde).
- Niveles de iluminación ambiental externa en la ubicación del sistema de inspección entorno a $E_{amb} \leq 50 \text{ lux}$.
- Pequeñas vibraciones ocasionadas por los elementos de la línea de producción y el propio sistema de accionamiento del movimiento de muestreo de la superficie podrían tener cierta repercusión en la nitidez de la imagen.
- Condiciones ambientales agresivas (polvo, suciedad, proyecciones de fluidos, ambiente corrosivo, etc.).

A tenor del conocimiento disponible de la escena, son varias las ideas que se extraen y que permiten establecer ciertas *características básicas* que ha de tener el sistema de iluminación:

- Iluminación homogénea sobre la superficie en todo el campo de visión de la cámara.
- Evitar la formación de sombras.

Una iluminación no homogénea podría originar zonas brillantes u oscuras. Las zonas brillantes podrían llegar a saturar el sensor CCD de la cámara y las oscuras reducir el nivel de gris de la imagen disminuyendo el contraste con el óxido residual y enmascarando el defecto.

Una iluminación direccional conjuntamente con la topografía irregular de la superficie, más acusada en aquellos acabados superficiales con tamaños de grano grueso, podrían originar sombras de niveles de gris lo suficientemente reducidos como para ser confundidos con manchas de óxido. Las sombras también podrían crearse por otros defectos superficiales que pudiera contener la superficie como son arañazos, grietas, marcas de rodillos, erosiones de material, etc.

- Evitar la formación de imágenes borrosas o movidas originadas por la velocidad relativa cámara-superficie inspección y posibles vibraciones.

Una imagen movida provoca que las manchas de óxido se difuminen en la dirección del movimiento relativo perdiéndose contraste entre la mancha y el fondo. En el mejor de los casos, la mancha tendrá un tamaño más reducido que el real cuando la imagen sea procesada. En el peor, con manchas de pequeño tamaño, éstas quedarán completamente difuminadas y no serán detectadas.

En el caso de las vibraciones, si su magnitud y frecuencia son suficientes como para afectar al proceso de adquisición y no es posible la aplicación de elementos de absorción de vibraciones, podría requerirse un menor tiempo de exposición para evitar las imágenes borrosas. A su vez, un menor tiempo de exposición necesitaría un sistema de iluminación de mayor potencia para mantener la iluminancia en el sensor de la cámara.

- Que esté integrado con el movimiento de la cámara.

El ancho máximo de las bobinas que son procesadas (entre 1500 y 1600 mm) conjuntamente con el muestreo que hay que realizar a la superficie requeriría, *a priori*, iluminar todo el ancho. Si el sistema de iluminación y cámara son instalados conjuntamente en el mismo sistema de desplazamiento solamente habría que iluminar el campo de visión de la cámara (24×32 mm) reduciendo en gran medida su tamaño y obteniéndose una serie de ventajas (mayor facilidad para su integración, menor potencia necesaria y menor coste del sistema).

- Limitación en las técnicas de iluminación aplicables.

La distancia de protección requerida para el sistema de iluminación, por un lado, y su integración con el movimiento de la cámara, por otro, limitan el empleo de algunas técnicas y elementos de iluminación debido a la complejidad de su implementación.

- Protección.

Requisito fundamental para proteger el sistema de iluminación y la cámara frente a condiciones ambientales adversas confiriéndole la adecuada protección mecánica y estanqueidad frente a proyecciones de fluidos, partículas de polvo y agentes ambientales corrosivos procedentes del proceso de producción.

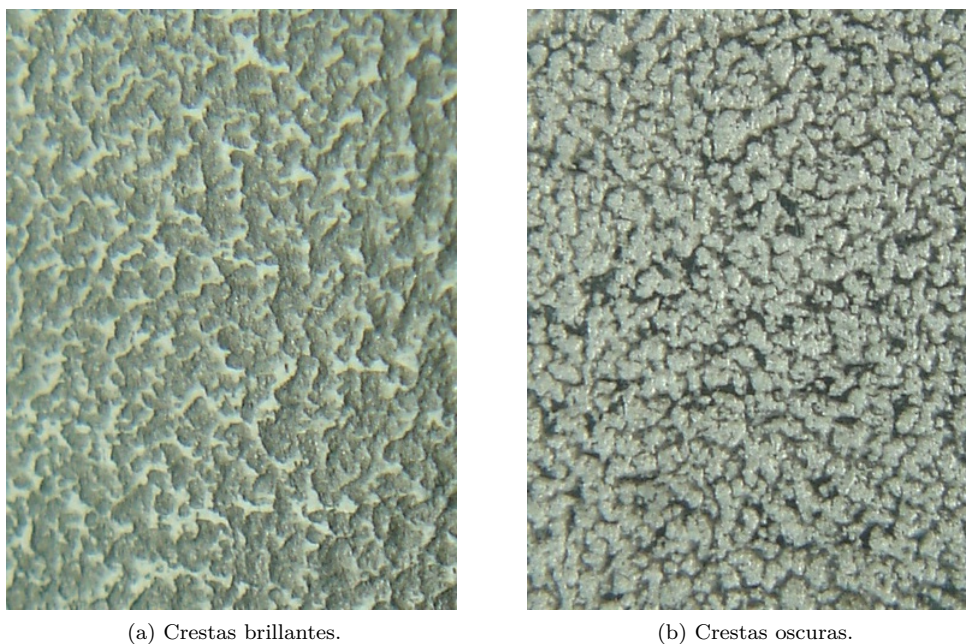
- Robustez.

Cualidad que debe tener la iluminación para hacer frente a condiciones agresivas del entorno como vibraciones e impactos, variaciones de temperatura, etc.

Aproximación a la técnica de iluminación.

La tabla 3.5 clasifica las técnicas aplicables según las distintas configuraciones del sistema de iluminación mostradas en la figura 3.8 (*Elección de la iluminación* en sección 3.2.6, capítulo 3). Si se pretende iluminar la superficie de la bobina mediante *luz incidente* (no tiene sentido hacerlo a contraluz), *se descartan*:

- La iluminación *telecéntrica*. Esta técnica requiere condiciones mecánicas estables ya que es muy sensible a vibraciones y a pequeñas variaciones en los ángulos de incidencia [109].



(a) Crestas brillantes.

(b) Crestas oscuras.

Figura 7.19: Iluminación incidente direccional.

- La iluminación mediante *luz estructurada*. No se precisa información 3D.

Así, las posibilidades que restan son la utilización de *iluminación direccional* o *iluminación difusa*.

Aunque, en principio, la iluminación direccional puede parecer poco apropiada debido a que se usa generalmente para mostrar bordes y estructuras de la superficie mediante reflexión y creación de sombras [109], se han realizado una serie de pruebas sobre muestras de acero inoxidable para constatar este hecho.

Las figuras 7.19a y 7.19b muestran las imágenes capturadas por una cámara dispuesta perpendicularmente a la superficie cuando una placa de muestra es iluminada direccionalmente bajo ángulos de inclinación diferentes. Estas imágenes han sido adquiridas en laboratorio en condiciones ideales con todos los elementos fijados (cámara, fuente de iluminación y muestra). En ambos casos se puede apreciar que no es posible alcanzar una iluminación homogénea de la superficie.

En la figura 7.19a las crestas de los granos aparecen más saturadas mientras que los valles aparecen más oscuros. Ésto es debido a que la mayoría de los haces de luz reflejados por las crestas inciden directamente sobre el sensor de la cámara mientras que los haces reflejados por los valles son dispersados en otros ángulos. En la figura 7.19b ocurre justamente lo contrario. Otra característica que se puede apreciar en ambas imágenes es la formación de pequeñas zonas sombreadas en la base de las crestas.

En la línea de producción, las condiciones en la que se va a presentar la superficie serán de lo más variado con ángulos de inclinación de la superficie completamente aleatorios. Bajo estas condiciones, se adquirirán imágenes muy diferentes entre sí donde resultará muy difícil la detección del óxido e imposible alcanzar unos resultados fiables.

Descartada la iluminación direccional queda finalmente la iluminación difusa.

Según el ángulo formado entre el sistema de iluminación y la superficie del objeto, la iluminación difusa puede implementarse de tres formas diferentes [109] (figura 3.8 en *Elección de la iluminación*, sección 3.2.6, capítulo 3):

- *Campo claro*. Usada en los siguientes casos:
 - Iluminación homogénea de superficies con texturas ligeramente heterogéneas.
 - Elementos opacos y transparentes reflectantes.
 - Elementos especulares.
 - Eliminación de marcas de máquinas y herramientas.
 - Reducción del contraste de bordes.
 - Reducción de brillos.
 - Reducción de contraste en materiales translúcidos.

Esta técnica se implementa mediante:

- Luz coaxial difusa.
- Inclinación de cámara y sistema de iluminación.
- *Campo claro parcial*. Uso en los siguientes casos:
 - Iluminación homogénea de elementos tridimensionales.
 - Enfatizar grietas en superficies cóncavas y convexas.
 - Reducción de la influencia de fisuras, grietas y deposiciones de polvo y suciedad.
 - Producción y eliminación de sombras.
 - Suavizado de texturas.

Esta técnica se implementa mediante:

- Anillos.
- Paneles.
- Anillos superdifusivos y domos o difusores semiesféricos.
- *Campo oscuro*. Usada en los siguientes casos:
 - Enfatizar contornos, formas, estructuras, texturas y bordes.
 - Enfatizar imperfecciones estructurales y superficiales (arañazos, arrugas, grietas, etc.).
 - Visualización de marcas de bajo relieve e impresiones en tinta.
 - Hacer transparentes objetos translúcidos.

Esta técnica se implementa mediante:

- Anillos especiales para campo oscuro.
- Iluminación puntual.
- Paneles direccionales.

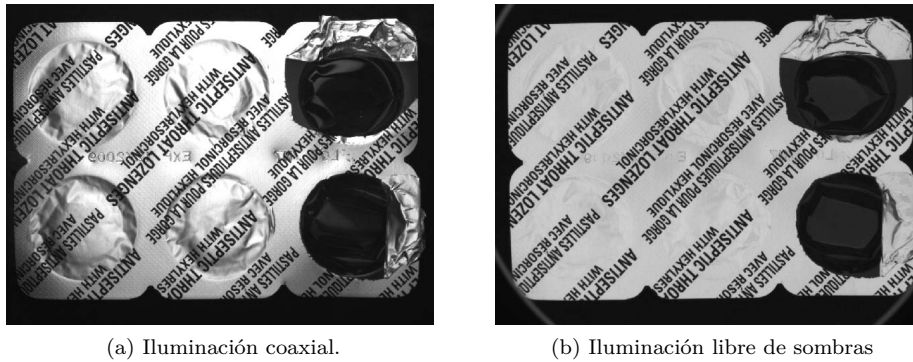


Figura 7.20: Comparativa iluminación difusa.

En las secciones C.1 y C.1.8 del apéndice C se desarrollan estas técnicas mostrando esquemas de montaje.

La *iluminación de campo oscuro* se puede descartar completamente ya que es muy diferente al tipo de iluminación requerido. Respecto al campo claro y al campo claro parcial no se pueden descartar inicialmente ninguna de ellas: en ambas hay características que pueden ser muy útiles.

La *iluminación coaxial difusa* y la *iluminación libre de sombras* (figura 7.20a y 7.20b respectivamente) iluminan superficies de forma muy homogénea y son ideales cuando se iluminan materiales altamente reflectivos. La iluminación coaxial difusa pertenece al grupo de iluminación de campo claro y la iluminación libre de sombras a la iluminación de campo claro parcial.

Mientras la iluminación coaxial está indicada para iluminación de superficies relativamente planas la iluminación libre de sombras es preferible cuando la superficie presenta cierto grado de curvatura. Ambas técnicas de iluminación requieren iluminar un área de superficie mayor a la que va a ser inspeccionada. En las dos técnicas la distancia de trabajo es muy importante y requieren estar cerca del objeto a iluminar ya que conforme aumenta la distancia la iluminación se vuelve cada vez más directa perdiendo su característica de difusa.

La *iluminación coaxial difusa* está limitada por la distancia de trabajo (por lo general la distancia de trabajo está comprendida entre 1 y 3 centímetros) lo que la hace incompatible con la distancia de seguridad requerida para el sistema de detección de óxido residual. Pero existe una excepción. Se podría utilizar una fuente de iluminación basada en láser para generar una iluminación coaxial difusa ya que el láser emite una luz muy intensa, coherente y monocromática. Pero tiene un inconveniente: el fenómeno del *speckle*. Cuando se ilumina una superficie rugosa con una fuente láser, la irradiancia que alcanza el sensor de la cámara genera una imagen con ciertas heterogeneidades creadas por la distribución aleatoria de una serie de puntos muy brillantes y muy oscuros. Estos puntos son originados por las interferencias (constructivas y destructivas) que se generan entre los haces reflejados por la superficie. Si se reduce la influencia de este defecto podría ser una buena opción como técnica de iluminación coaxial difusa, de hecho, ésta es una técnica de iluminación que ha sido probada con éxito en para la discriminación de óxido residual [19].

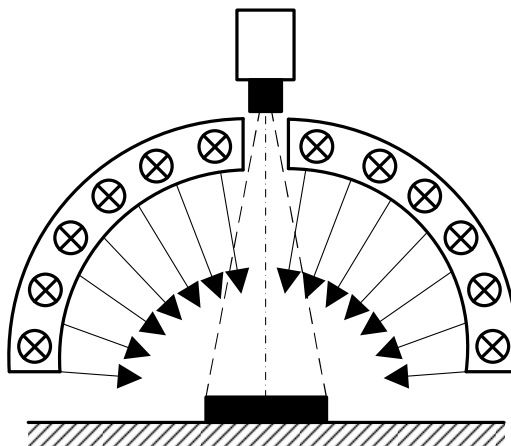


Figura 7.21: Principio de la iluminación libre de sombras.

En el caso de la *iluminación libre de sombras* un mayor tamaño del sistema de iluminación puede compensar una mayor distancia de trabajo. Por otro lado, las ondulaciones ocasionales que presenta la superficie de la banda (originadas por un exceso de laminación en la bobina) van a hacer más adecuada una iluminación libre de sombras frente a la coaxial difusa ya que se adapta mejor a éstas llegando a iluminar de forma homogénea superficies con inclinaciones de hasta $\pm 45^\circ$ [385].

La *iluminación libre de sombras* es el caso más extremo de la iluminación incidente difusa siendo el tipo de iluminación más adecuado para superficies que son metálicas y brillantes. El objeto o superficie es iluminado prácticamente desde cualquier dirección lo que requiere un cubrimiento casi total de éste (figura 7.21). Suele usarse cuando se pretende iluminar de forma homogénea materiales reflectantes donde se requiere un equilibrio de las componentes especular y difusa de la reflexión. Con este tipo de iluminación se va a evitar la aparición de zonas con sombras y brillos, se conseguirá el suavizado de la textura superficial y se reducirá la influencia de defectos superficiales (arañazos, grietas, etc.), polvo y suciedad y curvaturas formadas por la superficie [109, 386].

En definitiva, ésta es la técnica de iluminación que más se acerca a las características que debe tener el sistema de iluminación.

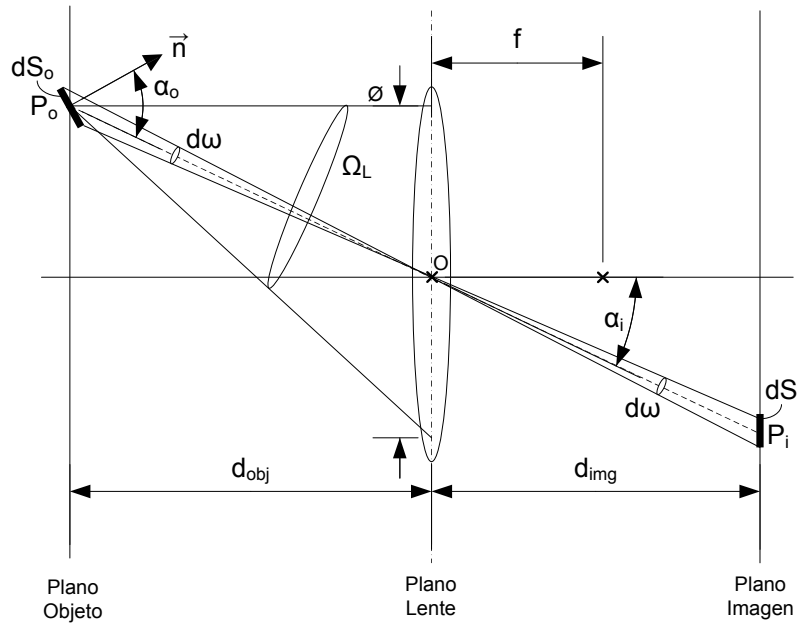


Figura 7.22: Radiometría de la lente delgada.

Radiometría de la lente delgada.

Desde el punto de vista radiométrico la denominada *ecuación de la cámara* describe la transferencia radiativa entre la superficie iluminada de un objeto y la superficie del sensor de una cámara (figura 7.22). Para la determinación de esta ecuación se consideraran las características del modelo de lente delgada, ya vistas anteriormente (7.3.3), y se asumirán ciertas restricciones:

- La radiancia emitida por un punto de una superficie se debe exclusivamente a la radiancia que incide sobre el mismo.
- Toda la radiación emitida por una superficie a una determinada longitud de onda es debida a la radiación que incide a la misma longitud de onda.
- Las superficies no generan radiación internamente.
- La radiancia de la superficie del objeto, L_o , es independiente de la dirección (superficie lambertiana, apéndice B, sección B.6.1).
- Las pérdidas en la lente son consideradas: $L_i = \tau_L \cdot L_o$, donde L_i es la radiancia en el plano imagen y τ_L es la transmitancia de la lente.
- Las pérdidas por transmisión a través del aire en el rango del espectro visible para las distancias en las que se está trabajando son muy pequeñas y se desprecian ($\tau_{\text{aire}} \approx 1$).

Aunque las propiedades de una imagen basadas en un sistema óptico real no son las mismas que para el sistema ideal, una modelización idealizada resulta ser una aproximación muy útil y sencilla para la determinación de ciertos parámetros de diseño y tener una visión cercana a los resultados que se van a obtener [387].

Consideremos (figura 7.22) un punto P_i centrado sobre una superficie diferencial dS_i situada en el plano imagen de la cámara donde se va a concentrar todo el flujo radiado desde el punto P_o situado en el plano objeto y centrado en la superficie dS_o . El ángulo formado entre la normal \vec{n} a la superficie dS_o y la dirección definida por la recta $\overline{P_o P_i}$ y que pasa por el centro de la lente O es α_o . El ángulo formado entre el eje óptico de la lente y la misma dirección $\overline{P_o P_i}$ es α_i .

Si se define $d\omega$ como el ángulo sólido subtendido (ver ecuación ángulo sólido subtendido en apéndice B, sección B.3b) tanto por dS_i como por dS_o respecto al centro O de la lente se tiene la siguiente relación:

$$d\omega = \frac{dS_i \cdot \cos \alpha_i}{(d_{img}/\cos \alpha_i)^2} = \frac{dS_o \cdot \cos \alpha_o}{(d_{obj}/\cos \alpha_i)^2} \quad (7.59)$$

Despejando la relación entre las superficies se tiene:

$$\frac{dS_o}{dS_i} = \frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha_o} \cdot \left(\frac{d_{obj}}{d_{img}} \right)^2 \quad (7.60)$$

De la misma forma anterior se puede definir el ángulo sólido subtendido por la lente desde el punto del objeto P_o como Ω :

$$\Omega_L = \frac{S_L \cdot \cos \alpha_i}{(d_{obj}/\cos \alpha_i)^2} \quad (7.61)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior el valor de la superficie expuesta por la lente $S_L = \pi \cdot \varnothing^2/4$ y que es función del valor del diámetro \varnothing de la apertura fijada, se tiene:

$$\Omega_L = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\varnothing}{d_{obj}} \right)^2 \cdot \cos^3 \alpha_i \quad (7.62)$$

Consideremos L_o como la radiancia en el punto P_o en la dirección P_i y E_i como la irradiancia en el punto P_i . Se puede expresar el diferencial de flujo $d\Phi$ emitido desde la superficie dS_o y que alcanza la lente en función de L_o de la siguiente forma [388, 66]:

$$d\Phi = L_o \cdot dS_o \cdot \cos \alpha_o \cdot \Omega_L \quad (7.63)$$

Si ambos miembros de la ecuación se dividen por dS_i se tiene el valor de la irradiancia E_i (apéndice B, ecuación B.5) en el punto P_i :

$$E_i = \frac{d\Phi}{dS_i} = L_o \cdot \frac{dS_o}{dS_i} \cdot \cos \alpha_o \cdot \Omega_L \quad (7.64)$$

Sustituyendo en la ecuación 7.64 el valor del ángulo sólido Ω_L de la ecuación 7.62 y el valor de la relación de superficies de la ecuación 7.60 y se simplifican términos se tiene:

$$E_i = \frac{\pi}{4} \cdot L_o \cdot \left(\frac{\phi}{d_{img}} \right)^2 \cdot \cos^4 \alpha_i \quad (7.65)$$

Recordando que $d_{img} = f \cdot (1 + \beta)$ (ecuación 7.54 en sección 7.3.3) y la definición del número-F ($(f/\#) = f/\phi$), la ecuación 7.65 se puede poner en función de la magnificación primaria β y del número-F quedando de la siguiente forma:

$$E_i = \frac{\pi}{4} \cdot L_o \cdot \frac{\cos^4 \alpha_i}{(f/\#)^2 \cdot (1 + \beta)^2} \quad (7.66)$$

Considerando las pérdidas producidas en la lente (transmisividad τ_L de la lente) la ecuación queda de la siguiente forma:

$$E_i = \frac{\pi}{4} \cdot \tau_L \cdot L_o \cdot \frac{\cos^4 \alpha_i}{(f/\#)^2 \cdot (1 + \beta)^2} \quad (7.67)$$

Recordando que la superficie dS_o es una superficie lambertiana se cumplirá la siguiente relación para la exitancia M_o de la superficie del objeto (apéndice B, sección B.6.1):

$$M_o = \pi \cdot L_o = E_o \cdot \rho \quad (7.68)$$

donde E_o es la irradiancia incidente sobre la superficie y ρ es la reflectividad de la superficie. Sustituyendo la relación 7.68 en la ecuación 7.67 queda finalmente:

$$E_i = E_o \cdot \rho \cdot \tau_L \cdot \frac{\cos^4 \alpha_i}{4 \cdot (f/\#)^2 \cdot (1 + \beta)^2} \quad (7.69)$$

Aunque en la ecuación 7.69 la mayoría de las variables son dependientes de la longitud de onda λ , ya que se han considerado magnitudes radiométricas, también es aplicable utilizando magnitudes fotométricas (rango del espectro comprendido entre 380 nm y 780 nm).

La introducción de la ecuación 7.69 tendrá su utilidad más adelante cuando se realice el cálculo de la iluminancia en el sensor de la cámara.

Iluminación y movimiento.

En la sección 7.2.6 se analizaron distintos aspectos relacionados con la inspección de un objeto con movimiento relativo respecto a la cámara ($V_{OC} \neq 0$) y la influencia que tiene éste sobre la calidad de la imagen adquirida. Aplicando la ecuación 7.10, se determinó el tiempo de exposición t_{exp} máximo que se debía imponer en la adquisición de la imagen para cumplir con el criterio de calidad cuando se consideraba un grado de borrosidad b en la imagen, el campo de visión FOV_i y la resolución de la cámara Rc_i en la dirección i del movimiento relativo.

El tiempo de exposición t_{exp} es una variable que, además de mantener una relación con el movimiento y con características de la cámara y su óptica, está relacionada con la iluminación del objeto estableciendo nexos de unión entre iluminación, cámara y movimiento. De esta manera, se puede definir la exposición H_i , en $lux \cdot s$ (magnitudes fotométricas), como la iluminancia que incide sobre el sensor de la cámara E_i durante un determinado tiempo de exposición t_{exp} :

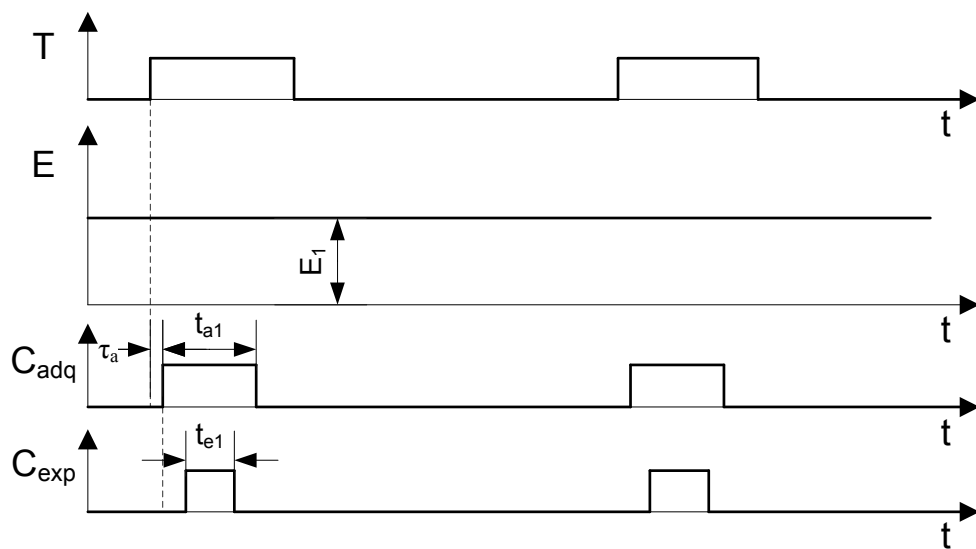
$$H_i = E_i \cdot t_{exp} \quad (7.70)$$

La ecuación 7.70 muestra que la exposición puede controlarse por medio del tiempo de exposición t_{exp} y la iluminancia E_i y, esta última, mediante la iluminancia que incide sobre la superficie del objeto inspeccionado (por ejemplo, variando la potencia del sistema de iluminación) y el número-F seleccionado en la óptica (ecuación 7.69). Un aumento (o disminución) del valor de la exposición provocará que el número de fotones que son convertidos en electrones en el sensor CCD aumente (o disminuya) obteniéndose imágenes más brillantes (u oscuras).

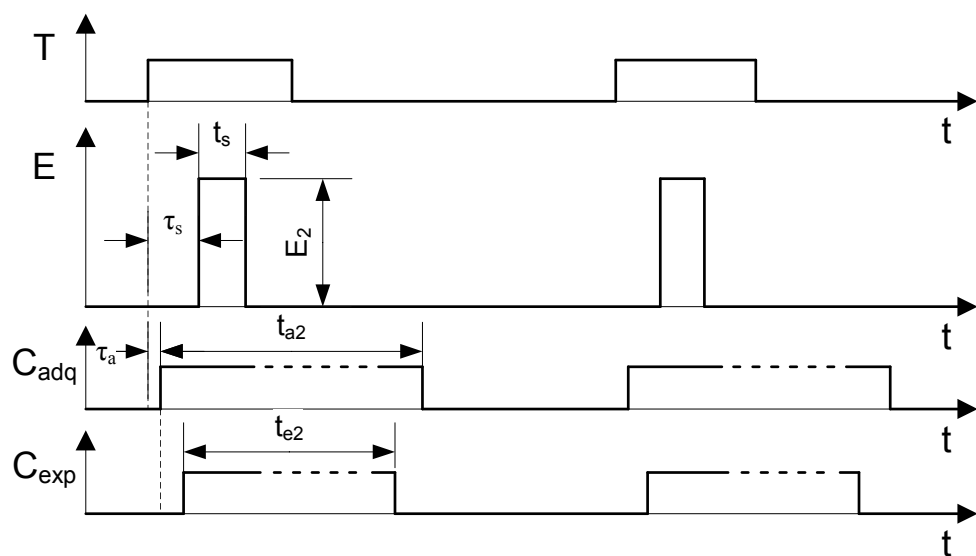
El concepto de exposición va a servir para introducir dos técnicas de iluminación que son muy comunes cuando se realiza una inspección con movimiento relativo entre el objeto a inspeccionar y la cámara: utilización del *obturador electrónico* (electronic shutter) de la cámara y utilización de *iluminación estroboscópica* (strobe).

Mediante el uso del obturador electrónico se controla el tiempo que va a estar abierta la apertura de la cámara permitiendo el paso de la luz hacia el sensor, es decir, el tiempo de exposición de la cámara. Dependiendo del tipo de cámara y de su modo de disparo, la velocidad de obturación puede variar entre decenas de milisegundos y valores entorno al microsegundo expresándose generalmente en fracciones de segundos ($1/16$, $1/30$, $1/60$, $1/100$, $1/250$, ... , etc.). De esta manera se puede llegar a alcanzar el tiempo de exposición requerido por el sistema para *congelar* la imagen.

Cuando se utiliza el *obturador electrónico* (figura 7.23a), la cámara es disparada mediante un pulso que controla la adquisición de la imagen. Tras un pequeño retardo de tiempo τ_a sobre el pulso de disparo, se inicia el proceso de adquisición cuya duración es t_{a1} . Dentro de este intervalo de tiempo, se producirá la apertura del obturador iniciándose la exposición del sensor a una iluminancia constante E_1 . Durante el tiempo que permanece abierto el obturador, t_{e1} , los píxeles estarán acumulando carga.



(a) Obturador electrónico.



(b) Iluminación estroboscópica.

Figura 7.23: Cronogramas de adquisición de imágenes.

Una vez finalizada la exposición, el obturador se cierra y la cámara realiza una serie de operaciones internas hasta que finalmente se obtiene la imagen en forma de señal analógica (cámara analógica) o en forma digital (cámara digital) momento en el cual finaliza la adquisición y la cámara espera el siguiente pulso de disparo. El valor de exposición que se ha obtenido es $H_1 = E_1 \cdot t_{e1}$.

En el caso de trabajar con tiempos de exposición muy pequeños, como el calculado para la detección del óxido residual ($t_{exp} \leq 35 \mu s$), la cámara ha de ser un tanto especial y deberá tener una velocidad de obturación muy elevada. Una solución que evita el empleo de este tipo de cámaras es la aplicación de iluminación estroboscópica [389, 179].

Esta técnica requiere el empleo de una iluminación pulsante, es decir, una fuente que genera un pulso luminoso de duración muy pequeña (flash o destello). Las fuentes pulsantes más comunes suelen estar basadas en LED y lámparas de xenón que generan pulsos con duraciones que van desde el microsegundo hasta varios cientos de microsegundos.

La figura 7.23b muestra la secuencia en la que se produciría la adquisición de una imagen mediante esta técnica. Ésta se inicia un tiempo τ_a después de la llegada del pulso de disparo momento en el cual comienza la exposición del sensor. El pulso luminoso se produce un instante después y se ajusta de manera que caiga dentro del tiempo de exposición t_{e2} seleccionado para la cámara. Para lograr este ajuste, se introduce un retardo τ_s a partir del disparo de la adquisición. Mediante esta técnica el valor de la exposición H_2 no dependerá del tiempo de exposición t_{e2} que se programe para la cámara (se puede alargar todo lo que se desee siempre y cuando el final de la adquisición finalice antes del disparo de la adquisición de la imagen siguiente) sino de la duración del pulso de la fuente de luz pulsante t_s y la iluminancia E_2 que alcanza al sensor, es decir, $H_2 = E_2 \cdot t_s$.

Así, mediante la iluminación estroboscópica se podría alcanzar el mismo valor de exposición que se obtendría con la técnica basada en el obturador electrónico:

$$H_1 = H_2 = E_1 \cdot t_{e1} = E_2 \cdot t_s \quad (7.71)$$

En la ecuación 7.71 se observa que para mantener el mismo valor de exposición, cuanto menor sea la duración del pulso t_s de la fuente de iluminación mayor deberá ser la potencia de la fuente.

Particularizando la técnica de la iluminación estroboscópica a la detección de óxido residual la primera condición que ha de cumplir la fuente de iluminación pulsante elegida será $t_s \leq 35 \mu s$. Una vez se fije el valor del t_s se seleccionará la potencia de la fuente.

Fuentes de iluminación.

La técnica de iluminación empleada para la detección de óxido residual deberá cumplir las especificaciones ya impuestas inicialmente y además tener en cuenta el movimiento de la banda. *Esto condicionará la elección de la fuente de iluminación¹⁰ que puede ser aplicada quedando las opciones reducidas a dos tipos: fuentes de iluminación basadas en lámparas de xenón y basadas en diodos LED.*

Las fuentes de iluminación basadas en *lámparas de xenón* pueden operar de forma continua y pulsante aunque este último es el modo de operación más común. El rango de longitudes de onda del espectro cubierto por este tipo de fuentes va desde los 150 nm hasta los 6 μm aproximadamente proporcionando un espectro casi continuo dentro del rango visible [109].

Al ser fuentes de tipo pulsante con duraciones de pulso cercanas al microsegundo son adecuadas para la captura de imágenes en las que existe un movimiento relativo elevado entre la cámara y el objeto inspeccionado. Además, disponen de una elevada frecuencia de disparo (permiten adquisiciones de imagen a alta velocidad) y proporcionan una luz extremadamente brillante y blanca.

Este tipo de fuentes también tienen sus inconvenientes:

- La amplitud de la intensidad lumínica se degrada entorno al 50 % tras unos millones de disparos.
- Existencia de pequeñas variaciones de intensidad entorno al 10 % entre disparos de la fuente.
- Geometrías limitadas. Las formas geométricas disponibles, pequeños tubos de longitud variable rectos o en forma de *u*, son integrados en carcasas para formar luminarias tipo proyector. Se puede aportar mayor flexibilidad mediante el acoplamiento de cables de fibra óptica a la fuente.

En cuanto a las fuentes de iluminación *basadas en LED*, también pueden ser usadas en modo continuo y pulsante, emiten luz en rangos muy estrechos (entorno a los 30 nm, prácticamente luz monocromática), en multitud de colores, pueden emitir en el infrarrojo, tienen larga vida útil (dependiendo de las condiciones de operación), son muy robustas y tolerantes a vibraciones y golpes (muy adecuadas en ambientes industriales), prácticamente sin variaciones en la intensidad lumínica, permiten casi cualquier tipo de forma y construcción (ideales para espacios limitados), bajo consumo eléctrico, etc.

Entre los pocos inconvenientes que tienen está la temperatura ambiente máxima en la que pueden operar, entorno a 60 °C, por encima de la cual se deterioran muy rápidamente.

Finalmente, indicar que el sistema de iluminación podría estar basado tanto en lámparas de xenón como en diodos LED ya que resultan ser fuentes adecuadas para poder implementar la técnica de iluminación libre de sombras bajo las condiciones de movimiento relativo cámara-objeto especificadas.

¹⁰ La sección C.2 del apéndice C muestra un pequeño resumen e imágenes de algunas de las *fuentes lumínicas* más comunes que suelen emplearse en visión industrial.

Implementación del sistema de iluminación.

Una vez establecidas las características que ha de tener el sistema de iluminación, la primera cuestión a resolver es determinar si existe en el mercado un sistema completo que cumpla con todas las características requeridas. En el caso de que se implante el sistema, ésta sería la opción más adecuada y simple partiendo de elementos ya estandarizados. De no ser así las alternativas, por orden de preferencia, serían las siguientes:

- Se encuentran todos los elementos comerciales por separado. Requerirá el ensamblado de elementos.
- No se encuentran todos los elementos. Requerirá el diseño, desarrollo y construcción de elementos (en su caso) y el ensamblado.

En cualquier caso, siempre será necesaria la prueba y verificación del funcionamiento completo del sistema tanto en laboratorio como en el ambiente real de operación.

Aunque en el mercado se han encontrado soluciones comerciales de sistemas de iluminación tipo domo que implementan la técnica de iluminación libre de sombras basadas en fuentes de luz pulsante tipo LED, ninguna de ellas es apta para operar a las distancias de trabajo establecidas. Tampoco ha sido posible encontrar todos los elementos por separado pero sí algunos de ellos lo que implica tener que construir parcialmente el sistema de iluminación. Los tipos de elementos comerciales que se encontraron fueron los siguientes:

1. Fuentes de iluminación basadas en lámparas de xenón con extensiones de cable de fibra óptica.
2. Proyectores basados en lámparas de xenón.
3. Proyectores basados en LED.

Las fuentes de iluminación basadas en lámparas de xenón (figura C.13a en apéndice C) tienen uno o varios cables de fibra óptica conectadas a la salida de la fuente a través de los cuales transmiten la iluminación desde la lámpara de xenón hasta un difusor de forma cónica situado en el extremo de salida de la fibra.

Para poder implementar la técnica de iluminación libre de sombras mediante este tipo de fuente es necesario reproducir el esquema básico de su principio (figura 7.21). Una posible forma es utilizando una campana difusora de color blanco mate en cuya parte inferior interna son fijadas las terminaciones de las fibras dispuestas por parejas enfrentadas y separadas entre sí diametralmente (figura 7.24). Éstas son orientadas apuntando hacia la mitad de la campana en el extremo opuesto para que la reflexión producida incida de forma difusa sobre la superficie de inspección. El modelo de fuente que se ha utilizado para implementar este sistema es el MVS – 2027 de Perkin Elmer.

Aún siendo adecuada la iluminación generada por este sistema (figura 7.25), tiene una serie de inconvenientes que limitan su aplicación desde el punto de vista práctico. La fuente de iluminación es bastante voluminosa y pesada, delicada y su instalación sobre un elemento que se encuentra en movimiento es bastante compleja. Éste último aspecto plantea la utilización de fibras especiales de gran longitud, resistencia y flexibilidad para poder ser instaladas entre la fuente que está fija y el conjunto campana-cámara que se encuentran en movimiento. Su inconveniente es que requieren el empleo de fuentes de elevada potencia y coste económico.



(a) Montaje en laboratorio.



(b) Montaje en línea de producción.

Figura 7.24: Sistema basado en fuente de xenón y fibra óptica.

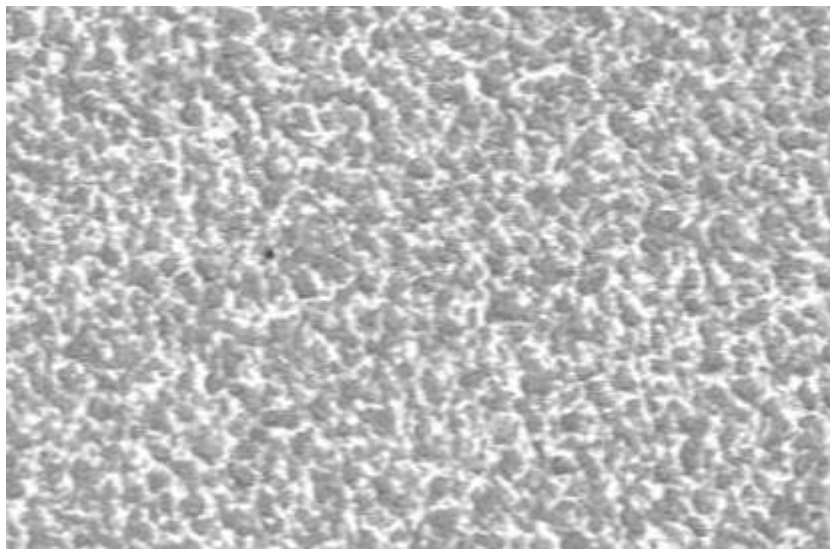
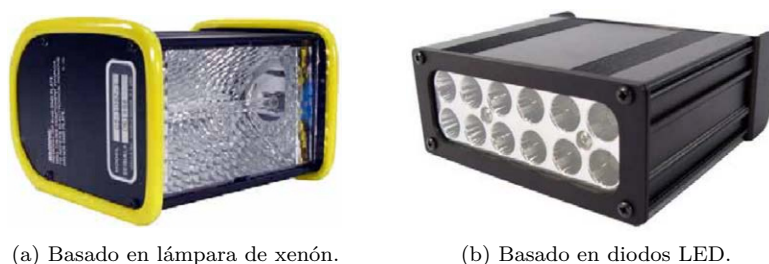


Figura 7.25: Imagen adquirida de la superficie (dimensión aproximada 6×8 mm).



(a) Basado en lámpara de xenón.

(b) Basado en diodos LED.

Figura 7.26: Proyector estroboscópico.

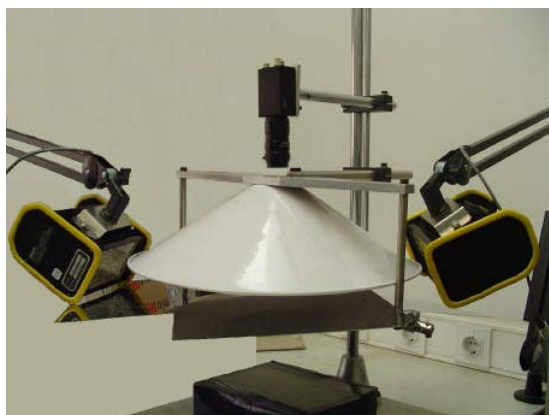
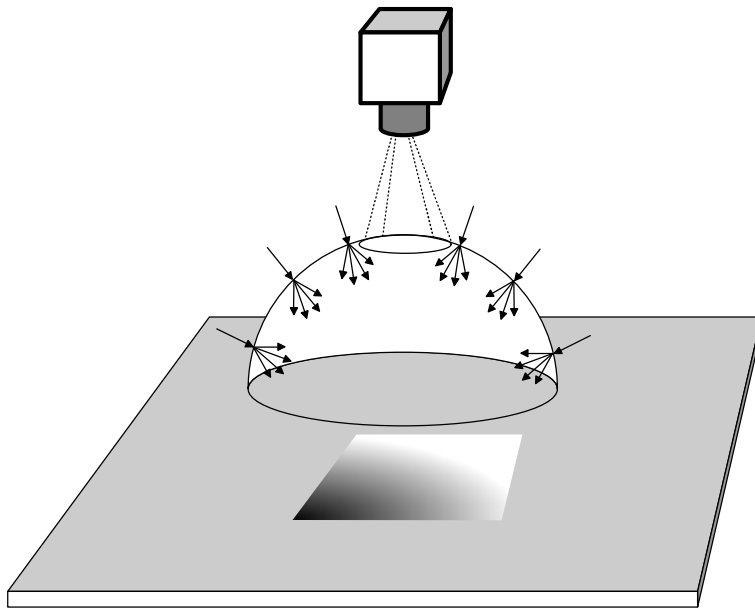


Figura 7.27: Sistema basado en proyectores.

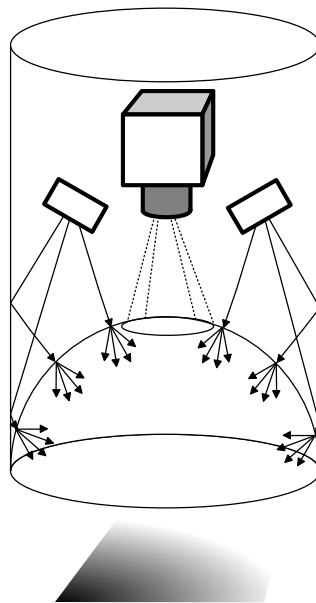
Los proyectores *basados en lámparas de xenón* (figura 7.26a) y los *basados en LED* (figura 7.26b) tienen una forma constructiva exterior similar a un paralelepípedo. Estos proyectores se alimentan generalmente en tensión continua de tipo estándar (12, 24, 48 VDC, etc.) y disponen internamente de la electrónica necesaria para adaptar la tensión a cada tipo de lámpara (xenón o diodos), la regulación y control del modo de operación (modo continuo o pulsante) y el sincronismo con la cámara.

La ventaja que tienen los proyectores es su menor dimensión y peso al estar todos los elementos de la fuente integrados en el interior de una carcasa compacta. En cambio, su forma rígida dificulta la implementación de la técnica de iluminación mediante la campana difusora (la figura 7.27 muestra un montaje con espejos). Otro inconveniente de los proyectores es que no disponen de difusor y la iluminación que generan suele ser bastante direccional. Así, la implementación de la técnica de iluminación libre de sombras mediante el uso de proyectores deberá realizarse mediante otra forma constructiva válida.

Ante la dificultad de iluminar la superficie de inspección de esta forma, se planteó hacerlo desde el exterior de una campana o semiesfera fabricada de material traslúcido (figura B.2b en apéndice B). De esta manera, cualquier haz de luz que incidiera sobre la superficie traslúcida la atravesaría dispersándose y generando una iluminación difusa (figura 7.28a).



(a) Iluminación difusa a través de la semiesfera.



(b) Iluminación mediante proyectores.

Figura 7.28: Técnica de iluminación basada en semiesfera traslúcida.

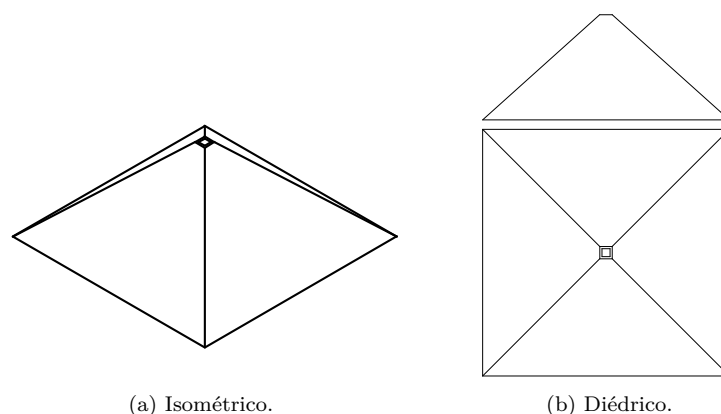


Figura 7.29: Pirámide difusora.

Si, además, se lograra que los haces provenientes de los proyectores incidieran homogéneamente por toda la superficie exterior de la semiesfera se conseguirá una iluminación difusa homogénea de la superficie de inspección [390]. Ésto podría requerir la utilización de un gran número de proyectores pero se puede conseguir una buena aproximación empleando un número menor.

Para ello, se ubican los proyectores dentro de un cerramiento y se fijan y orientan buscando maximizar la cantidad de haces reflejados por la superficie interna del cerramiento de tal manera que incidan sobre cualquier punto de la superficie de la semiesfera (figura 7.28b). La superficie interna del cerramiento deberá ser blanca y mate con objeto de minimizar la absorción de luz y maximizar la dispersión de los haces reflejados.

Una vez establecida la geometría constructiva del sistema de iluminación, el siguiente paso es seleccionar el material traslúcido a emplear para la construcción de la semiesfera. *Bajo la consigna de elegir un material que presentara una difusión homogénea cercana a un fuente de iluminación lambertiana, de elevada transmitancia, con gran disponibilidad en el mercado, variedad de formas y dimensiones, mecánicamente resistente, ligero, fácil limpieza y de bajo coste se realizaron pruebas con varios materiales encontrándose como más adecuado el policarbonato blanco opal.*

Aunque este material es fácilmente moldeable, pudiendo solicitarse al fabricante su construcción en forma de semiesfera, *los primeros ensayos se hicieron con planchas de policarbonato mecanizadas y unidas formando una pirámide de base cuadrada (figura 7.29).* Se trata de una figura volumétrica simple que puede ir encerrada dentro de un paralelepípedo ortogonal resultando un conjunto de fácil construcción e ideal para la realización de ensayos.

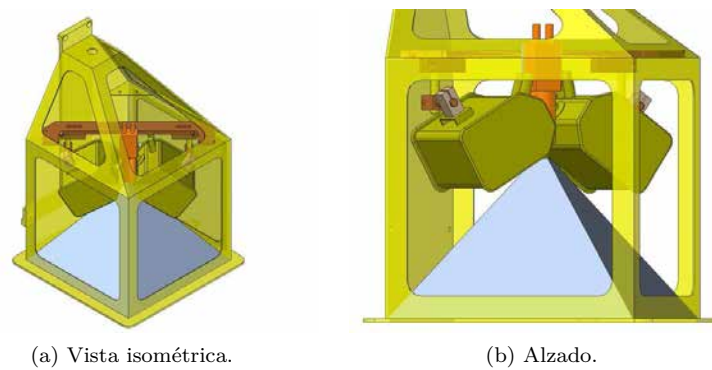


Figura 7.30: Interior caja difusora.

Simulación del sistema de iluminación.

El sistema de iluminación está compuesto por una pareja de proyectores estroboscópicos fijados en una posición determinada en el interior de la denominada caja difusora (figura 7.30). Esta caja está construida de acero inoxidable y va recubierta internamente de una capa de pintura blanca mate para reproducir el efecto de difusión de una superficie lambertiana y reducir al mínimo las pérdidas por absorción de las superficies internas proporcionando, de esta forma, un alto grado de reflexión de las paredes en la máxima variedad de direcciones posibles. Las dimensiones finales de la pirámide difusora y el cerramiento se han determinado en base a ensayos realizados en laboratorio.

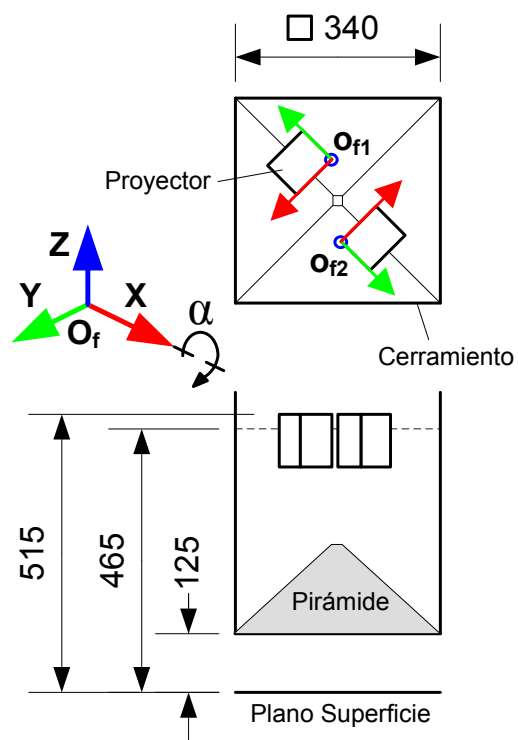
Por otro lado, para conseguir una mayor grado de difusión y *homogeneizar* la iluminación producida por las reflexiones de las superficies internas se fija, en el interior de la caja, una pirámide difusora de policarbonato blanco opal traslúcido.

El objetivo de la simulación no consiste en realizar el cálculo exacto de la iluminación recibida por la superficie sino obtener una aproximación que permita posicionar y orientar adecuadamente los proyectores estroboscópicos dentro de la caja difusora de manera que se alcancen los niveles mínimos teóricos de iluminancia que recibiría una superficie plana situada a una determinada distancia de trabajo.

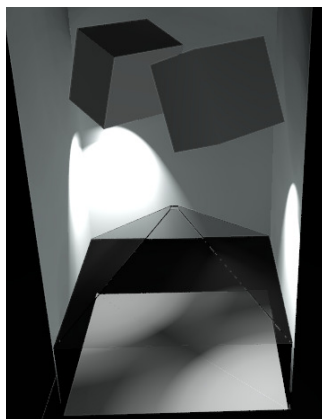
Para la simulación se ha utilizado un software denominado DIALux ([391]) cuyo método de cálculo está basado en la radiosidad y tiene en cuenta tanto la reflexión directa de las luminarias sobre las superficies como la reflexión entre superficies iluminadas (reflexión indirecta).

El programa de simulación requiere que se introduzcan una serie de datos, entre ellos, los siguientes:

- Datos fotométricos de los proyectores.
- Datos dimensionales y materiales de las superficies de la caja difusora.
- Ubicación de los proyectores en el interior de la caja.



(a) Ubicación de elementos.

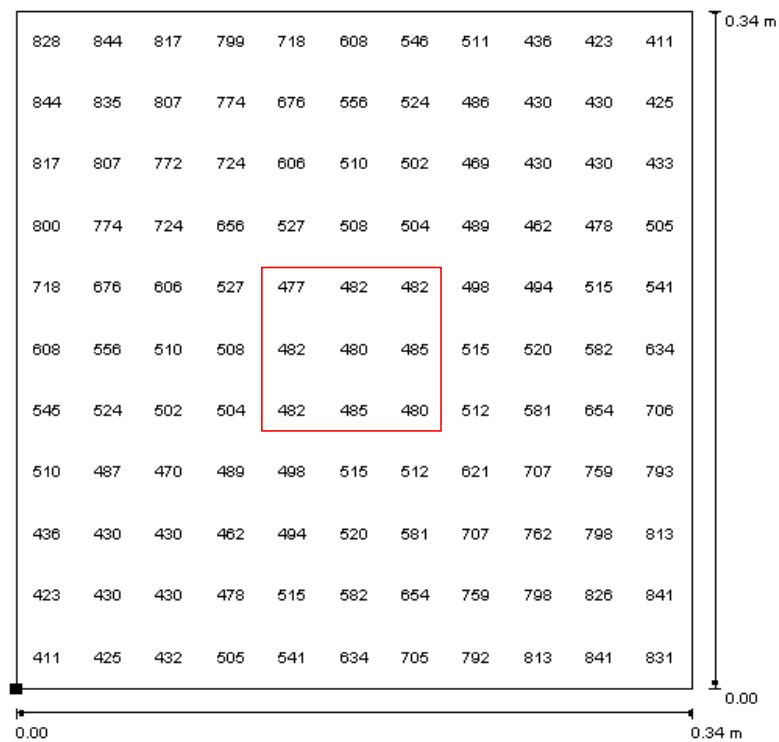


(b) Infografía.

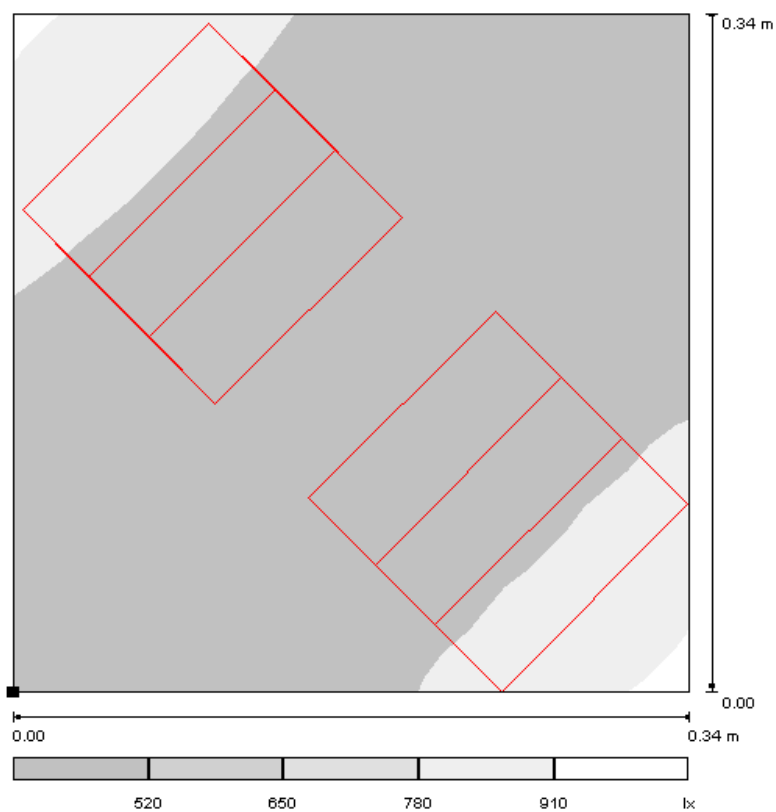


(c) Montaje en laboratorio.

Figura 7.31: Ensayos y simulaciones.



(a) Tabla.



(b) Gama de grises.

Figura 7.32: Iluminancia sobre superficie de cálculo.

En el apéndice D, *Simulación del sistema de iluminación*, se detalla el algoritmo de cálculo que emplea DIALux para la simulación, las características de los proyectores y sus curvas fotométricas, dimensiones y características de la pirámide y del cerramiento, posición y orientación de los proyectores dentro del cerramiento y los resultados finales obtenidos de la simulación.

El sistema se ha simulado incluyendo el cerramiento, la pirámide difusora y una pareja de proyectores dispuestos en oposición y orientados hacia la zona donde se alcanza el mayor grado de reflexión sobre las superficies laterales del cerramiento, es decir, hacia los rincones (figuras 7.31a, 7.31c y 7.31b).

En las simulaciones se han utilizado dos modelos distintos de proyectores estroboscópicos de lámpara de xenón: Cricket y Lith-o-Light-5 ambos de Unilux Inc. El modelo Cricket tiene un consumo máximo de 18 w y el Lith-o-Light-5 de 30 w. Cada simulación ha consistido en variar una cierta cantidad el ángulo α de cada proyector (ángulo de giro sobre el eje X). La variación de α se ha realizado entre 0° y 60° en intervalos de 10° con ambos modelos de proyectores.

Los resultados que se obtienen en cada simulación son los valores teóricos de iluminancia sobre la superficie de cálculo en formato tabular (figura 7.32a) y su representación en gama de grises (figura 7.32b). Mediante otra opción del programa DIALux se genera una infografía del conjunto proporcionando una idea aproximada de cómo va a quedar iluminado interiormente el cerramiento y la superficie de cálculo (figura 7.31b).

La superficie de cálculo tiene unas dimensiones de $340 \times 340 \text{ mm}$ y se divide en 11×11 zonas de $30,9 \times 30,9 \text{ mm}$ obteniéndose en cada una de ellas la iluminancia en lux (figura 7.32a). Puesto que la cámara se posiciona perpendicular a la superficie de cálculo y centrada respecto a ésta, el valor de la zona central de la cuadrícula se corresponde aproximadamente con el campo de visión de la cámara a la distancia de trabajo ($\text{FOV} = 24 \times 32 \text{ mm}$). Se ha marcado con un recuadro los valores de iluminancia correspondientes con la zona central y sus adyacentes ya que forman el área de interés donde se desean analizar los niveles y la homogeneidad de la iluminación.

La representación gráfica de la figura 7.33a muestra el valor promedio de la iluminancia \bar{E}_m del área de interés formada por las nueve zonas consideradas en función del ángulo de rotación α de los proyectores. En ambos proyectores se observa un comportamiento similar con dos zonas claramente diferenciadas. Una primera zona entre los 0° y los 20° donde se produce una rápida disminución de la iluminancia como consecuencia de que aún los proyectores inciden directamente sobre la superficie de cálculo. A partir de los 20° se observa una disminución progresiva de la iluminancia pero ya en un menor grado lo que significa que toda la iluminancia recibida por la superficie está originada por las reflexiones de las paredes.

Para evaluar la homogeneidad en el área de interés se calcula el error absoluto medio (EAM) de la iluminancia respecto al valor central. El gráfico de la figura 7.33b muestra el EAM respecto al ángulo α . Nuevamente se aprecia un comportamiento parecido en ambos proyectores. En este caso se observan tres zonas. Una primera zona, con valores elevados del error, que se corresponde con una iluminación bastante heterogénea (entre 0° y 20°), una segunda zona muy homogénea (entre 20° y 30° para el Cricket y 20° y 40° para el LoL-5) y una tercera en la que se produce un pico del error (40° para el Cricket y 50° para el LoL-5).

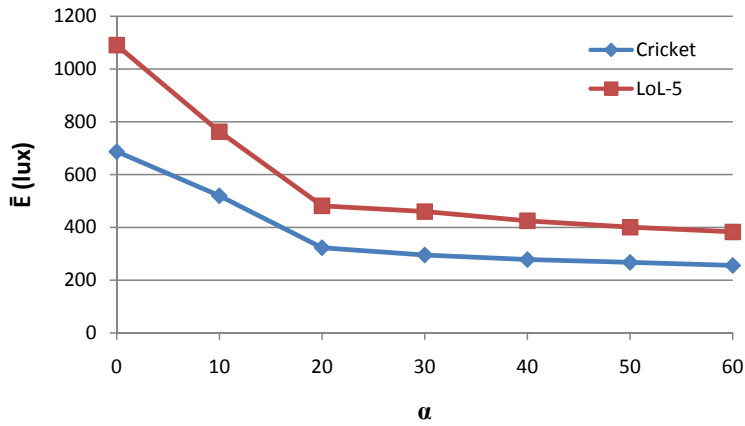
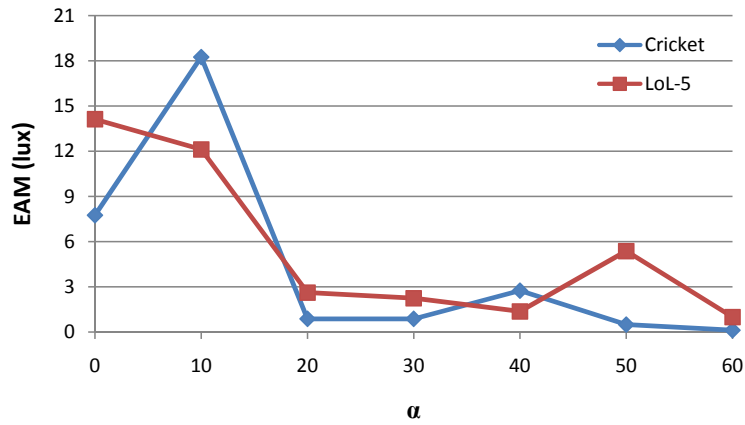
(a) Iluminancia promedio E_m frente al ángulo de rotación α .(b) Error absoluto medio EAM frente al ángulo de rotación α .

Figura 7.33: Resultados de la simulación.

A partir de los resultados, y considerando como criterio alcanzar la máxima iluminancia y homogeneidad sobre la superficie de cálculo, el ángulo α más apropiado es 20° para ambos proyectores.

Finalmente se va a realizar una estimación teórica de la iluminancia que alcanzará al sensor CCD de la cámara a partir de los resultados de iluminancia obtenidos para el modelo de proyector de mayor potencia (Lith-o-Light-5) girado un ángulo $\alpha = 20^\circ$.

El valor correspondiente de iluminancia para la zona central de la superficie de cálculo es de $E_o = 480$ lux (ver figura D.18 en apéndice D). Basándose en la curva de reflectividad del acero inoxidable de la figura 6.11a (*Estudio espectrofotométrico* 6.3 en capítulo 6), se considerará una reflectividad $\rho \approx 0,35$.

Suponiendo que la superficie del acero inoxidable es una superficie lambertiana, que no lo es, se podría aplicar la ecuación 7.69 y considerando un valor medio de $\tau_L \approx 0,9$ para la transmitancia de una lente con capa anti-reflectiva [109] y los valores ya establecidos para la magnificación primaria ($\beta = 0,2$) y el número-F ($(f/\#) = 5,6$), el valor de la iluminancia en el centro del sensor CCD de la cámara ($\alpha_i = 0$) es:

$$E_i = 480 \cdot 0,35 \cdot 0,9 \cdot \frac{1}{4 \cdot 5,6^2 \cdot (1 + 0,2)^2} = 0,83 \text{ lux} \quad (7.72)$$

De la misma forma se podría estimar la iluminancia que alcanza al sensor CCD pero esta vez considerando una iluminancia ambiental máxima de $E_o = E_{amb} = 50 \text{ lux}$ resultando un valor $[E_i]_{amb} = 0,08 \text{ lux}$.

Muchos fabricantes de cámaras proporcionan varias medidas de sensibilidad de sus cámaras que incluyen el gráfico de respuesta espectral, valores de sensibilidad de los píxeles (conversión de carga), etc. que en la mayoría de las ocasiones son complicados de interpretar. Por este motivo, suelen dar una medida aproximada del mínimo valor de iluminancia, expresado en lux, capaz de excitar el sensor para producir una imagen discernible.

Considerando el valor de iluminancia mínima aportado por el fabricante $[E_{min}]_{CCD}$, se podría verificar si los niveles de iluminancia en el sensor CCD de la cámara E_i obtenidos por el sistema de iluminación son suficientes para excitar el sensor y si la iluminancia $[E_i]_{amb}$ generada por la luz ambiental podría afectar a nuestro sistema. Así, para que se pueda excitar al sensor CCD sin que afecte la iluminación ambiental se debería cumplir la siguiente condición:

$$E_i \geq [E_{min}]_{CCD} > [E_i]_{amb} \quad (7.73)$$

Para el caso particular de la cámara seleccionada, el fabricante nos indica un valor mínimo de iluminancia de $[E_{min}]_{CCD} = 0,3 \text{ lux}$ cumpliéndose, por tanto, la condición de la ecuación 7.73.

ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL

En el capítulo 7 se planteó una solución para el diseño del sistema de detección de óxido residual en base a una serie de criterios y especificaciones. Concretamente se definió el tipo de sistema necesario, los criterios para la detección del defecto, los requerimientos de funcionamiento (cuál va a ser la ubicación y características del entorno del sistema), el tiempo necesario para la adquisición y procesamiento de la imagen y los elementos que componen el sistema (cámara, óptica, sistema de iluminación, hardware de procesamiento, etc.).

La siguiente cuestión a resolver consistirá en determinar cuál debe ser la estrategia de procesamiento de imagen para realizar una detección de óxido fiable y robusta a partir de las imágenes adquiridas por el sistema.

8.1 ESTRATEGIA GENERAL PARA LA DETECCIÓN DE ÓXIDO RESIDUAL.

El problema de la detección de óxido podría plantearse como la detección de defectos en superficies empleando técnicas y métodos de visión por computador sobre la que se aplican una serie de criterios y condiciones de contorno:

- *Homogeneidad del material.* La composición y estructura química del material inspeccionado se considera uniforme. Aunque, de una manera exhaustiva, esto no es del todo cierto: los materiales que son inspeccionados son aceros inoxidables con distinta composición y estructura (ferríticos, austeníticos y dúplex) y las variaciones existentes entre ellos no son lo suficientemente grandes como para ser considerados heterogéneos.
- *Defectos locales.* Los defectos que se van a detectar son pequeñas manchas puntuales de óxido residual¹ de entre 50 μm y 200 μm cuyo pequeño tamaño no van a cambiar de forma significativa las propiedades físicas y químicas globales del material. En cambio, su distribución a lo largo de la superficie del material sí afectará a la calidad de éste y, en consecuencia, a la calidad del producto. A este respecto, en el caso de que una imagen contenga defectos de óxido, la proporción de superficie que contiene defectos respecto a la superficie libre de éstos es muy pequeña lo que puede complicar la detección de los defectos.
- *Contraste del defecto.* Si el problema planteado se pretende resolver mediante la aplicación de técnicas simples de procesamiento de imagen, el defecto (óxido residual) ha de contrastar respecto al material a inspeccionar (acero inoxidable). En el caso de utilizar una cámara monocroma, ha de existir cierta diferencia entre la luminancia del defecto y la luminancia de la superficie del material libre de defecto para que se pueda detectar el defecto.

¹ Definido en sección 6.2.2 del capítulo 6.

En este sentido, los resultados del *Estudio Espectrofotométrico* (sección 6.3 en capítulo 6) indicaban la existencia de cierta diferencia o contraste entre la reflectancia del acero inoxidable y el óxido residual en longitudes de onda que se corresponden con la luz visible cuya máxima diferencia, 0,281, se alcanzaba en el entorno del color verde (550 nm).

- *Restricciones temporales.* La tarea de visión a realizar ha de cumplir ciertas restricciones temporales, es decir, se han de adquirir y procesar un determinado número de imágenes por unidad de tiempo. Estos requerimientos, especificados en la sección 7.2.7 del capítulo 7, se basaban en un muestreo de la superficie del acero cuyo número mínimo de muestras (o imágenes) a adquirir era aproximadamente de una muestra por segundo.

Para cumplir con esta restricción han de tenerse en cuenta numerosos aspectos tanto hardware (resolución de la cámara, bus de transferencia de imagen, capturadoras, hardware computacional, etc.) como software (sistema operativo, algoritmos empleados en la tarea de visión, interfaz de usuario, almacenamiento y transferencia de datos, comunicación con otros equipos, etc.).

En general, siempre se tratará resolver la tarea de visión llegando a un compromiso entre el nivel de complejidad de las técnicas y métodos de visión aplicados al problema y el nivel de fiabilidad y robustez exigido a los resultados.

- *Entorno industrial hostil.* La dificultad que entraña la realización de una inspección superficial en tiempo real se complica cuando tiene que realizarse en una fábrica de producción de acero inoxidable. En este entorno hostil, el sistema de inspección debe protegerse frente a otros problemas que, en mayor o menor grado, podrían afectarlo (temperatura del entorno, presencia de polvo, aceite, agua, vibraciones, golpes, etc.).

Una vez establecidas estas condiciones de contorno, *la detección de defectos va a consistir en un proceso discriminatorio de la información subyacente en la imagen, es decir, qué se considera defecto en la imagen (óxido residual) y qué no (superficie de acero inoxidable libre de óxido).*

Representando una imagen como una matriz rectangular de $M \times N$ elementos correspondientes con los niveles de gris de los píxeles de la cámara, *el proceso discriminatorio consistirá en aplicar sobre esta matriz una serie de operaciones matemáticas cuyo resultado será otra matriz compuesta de variables discretas de tipo binario donde el valor 1 se corresponderá con aquellos píxeles que se consideran defecto y el valor 0 con aquellos libre de defecto (o viceversa).*

Generalmente, la discriminación no será perfecta y habrá píxeles mal clasificados. La evaluación de la bondad de esta clasificación, bajo uno o varios criterios objetivos², se hará inevitablemente necesaria para poder determinar el rendimiento global de la estrategia empleada por el sistema de detección y, en el caso de haber varias de ellas, poderlas comparar con objeto de seleccionar aquella que minimice el error de clasificación.

² Criterios de evaluación objetivos del rendimiento de algoritmos (sección 5.2.1 en capítulo 5).

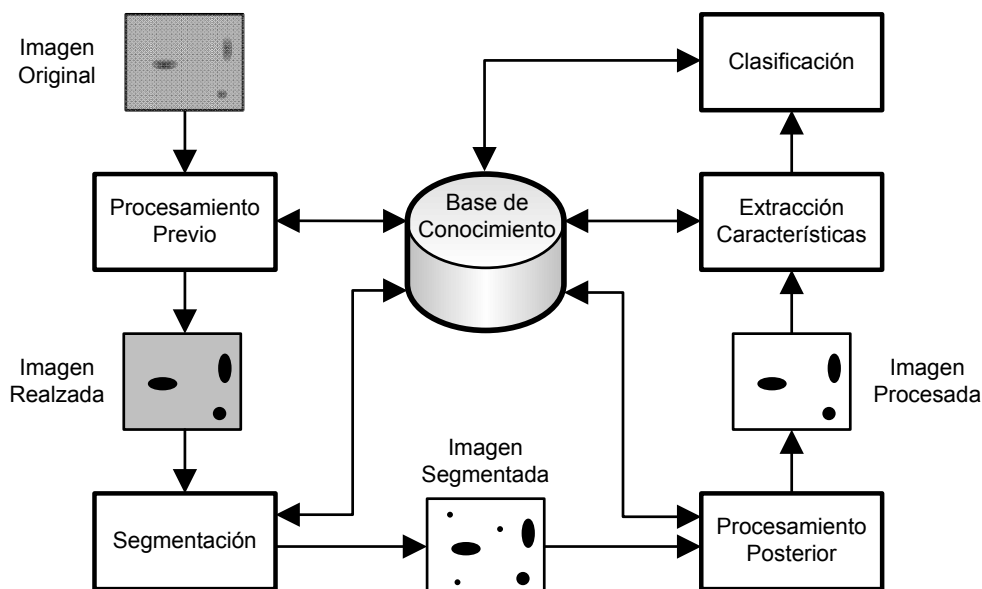


Figura 8.1: Detección y clasificación de defectos de óxido residual.

Según las especificaciones dimensionales establecidas para el defecto³, el tamaño mínimo detectable por el sistema quedaba definido por una estructura cuadrada de 2×2 píxeles. De esta manera, aquellos píxeles que han sido considerados defecto tras la etapa de segmentación y no superan el tamaño mínimo serán designados como falsos positivos FP y eliminados durante la etapa de postprocesamiento. Los píxeles restantes serán evaluados para determinar los grupos que conforman dentro de la imagen y que se corresponden con manchas de defecto. Finalmente, se clasificarán las manchas según su tamaño y se extraerán unos índices que cuantifican el grado de calidad superficial de la bobina de acero inspeccionada.

De esta manera, la secuencia de detección de defectos y clasificación podría estar compuesta por cinco bloques fundamentales de procesamiento (figura 8.1):

1. *Preprocesamiento*. Su objetivo fundamental será adecuar la imagen para que el bloque posterior de segmentación sea más simple y efectivo. Este proceso consistirá en la eliminación del ruido existente en la imagen y el aumento del contraste entre manchas de óxido y superficie de acero.
2. *Segmentación*. Bloque donde se aplican algoritmos que discriminan las manchas de óxido de la superficie. El resultado será una imagen binaria donde los píxeles candidatos a defecto son etiquetados por un valor binario.
3. *Postprocesamiento*. Aplicación de técnicas basadas en operaciones morfológicas para la eliminación de falsos positivos y el realce de los defectos encontrados.
4. *Extracción de características*. Determinación de las dimensiones de las manchas de óxido residual detectadas en la imagen.
5. *Clasificación*. Clasificación de las manchas según su tamaño.

³ Sección 7.3.2 del capítulo 7.

La mejora del rendimiento global del proceso de detección y clasificación no se podrá realizar considerando aisladamente cada bloque puesto que todos ellos están relacionados en cierto modo.

Por otro lado, se trata de una secuencia dinámica, es decir, la información disponible *a priori* sobre la problemática de la detección de óxido es actualizada con nuevo conocimiento (caracterización de la línea de producción y entorno, inspección realizada por el operador humano, sistema de adquisición de imágenes, etc.). A partir de esta base dinámica de conocimiento se dispondrá de información para seleccionar, adaptar o mejorar los algoritmos involucrados en cada bloque de procesamiento.

8.1.1 Segmentación mediante umbralización.

Al comienzo de la sección, se hacía referencia al contraste existente entre el óxido residual y la superficie de acero inoxidable libre de óxido observado a partir de las curvas de reflectancia correspondientes con el *Estudio Espectrofotométrico*.

Por otro lado, la tarea de visión orientada a la detección de los defectos debe cumplir ciertas restricciones temporales respecto al número mínimo de imágenes a adquirir y procesar por unidad de tiempo.

Las técnicas de segmentación basadas en umbralización son relativamente simples y atractivas debido a su bajo coste computacional. Su aplicación resulta muy interesante cuando los niveles de gris de los píxeles que pertenecen a un objeto a segmentar contrastan con los del fondo de la imagen.

Basándose en estos antecedentes, se toma la decisión de tratar de resolver el problema de detección de óxido residual empleando como técnica de segmentación la umbralización pensando que se pueden llegar a alcanzar unos buenos resultados de detección de defectos según las especificaciones impuestas.

De esta manera, la discriminación de los defectos podría determinarse mediante el empleo de técnicas de umbralización basadas en el análisis de la forma del histograma⁴, es decir, mediante el análisis de los mínimos, máximos, curvatura, etc. existentes en el histograma de la imagen. El resultado del análisis sería la determinación del umbral T correspondiente con el nivel de gris más adecuado para la discriminación del defecto.

Garantizar esta discriminación o clasificación de los píxeles no resulta fácil y requiere de la existencia de cierto grado de contraste entre los niveles de gris de los píxeles considerados como defecto y los niveles de gris del resto de píxeles. En concreto, la existencia de cierto grado de contraste ΔI_c entre los defectos y las zonas más oscuras de la imagen libre de defecto, es decir, los valles existentes sobre la superficie (figura 8.2).

⁴ Fundamentos y estado del arte de la *Umbralización* se muestran en sección 4.2.1, capítulo 4.

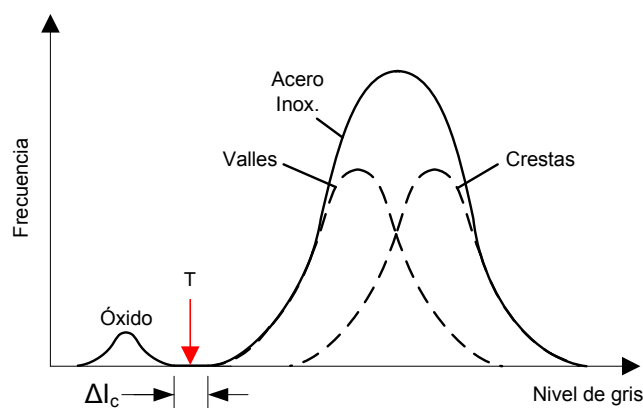


Figura 8.2: Histograma genérico una imagen con defectos de óxido.

Observando la figura 8.2 donde se muestra un *histograma ideal* de una imagen con defectos, el histograma está compuesto por dos lóbulos: lóbulo menor correspondiente con el óxido y lóbulo mayor correspondiente con el resto de superficie libre de defecto. Este último está compuesto, a su vez de dos lóbulos correspondientes con las crestas y los valles. En el histograma mostrado, el umbral T sería un buen valor del nivel para discriminar el defecto.

En la realidad, este histograma ideal no se produce normalmente debido a varios factores:

- Ruido existente en la imagen que introduce niveles de gris entre los dos lóbulos principales (óxido y superficie libre de defecto).
- Iluminación no homogénea.
- Reflexiones internas originadas por la propia topografía de la superficie.
- Aparición de otros defectos.

La obtención de histogramas de la imagen cercanos al ideal facilitarían el proceso de umbralización y un mayor grado de acierto en la detección de los defectos. Éste será, por tanto, el objetivo final de la estrategia de preprocesamiento de imagen y, como ya puede intuirse, el éxito de las siguientes etapas de procesamiento dependerá de los resultados obtenidos durante el preprocesamiento.

8.2 PREPROCESAMIENTO DE LA IMAGEN.

Durante la etapa de preprocesamiento (figura 8.3) se van a realizar una serie de operaciones sobre la imagen para adecuarla a la etapa posterior de segmentación. Son las siguientes:

- Eliminación/reducción del ruido de alta frecuencia existente en la imagen y realce del contraste entre las manchas de óxido residual y la superficie libre de defecto. Esta operación se realizará mediante un *filtrado con preservado de bordes*.
- Eliminación/reducción del ruido de baja frecuencia originado por una iluminación no homogénea. Operación realizada mediante la *subdivisión de la imagen completa en subimágenes*.
- *Cálculo de histograma de la subimagen* y otros *índices estadísticos* representativos de la subimagen necesarios para la segmentación.
- Suavizado de histograma. Para ello se empleará un *filtro digital FIR*.

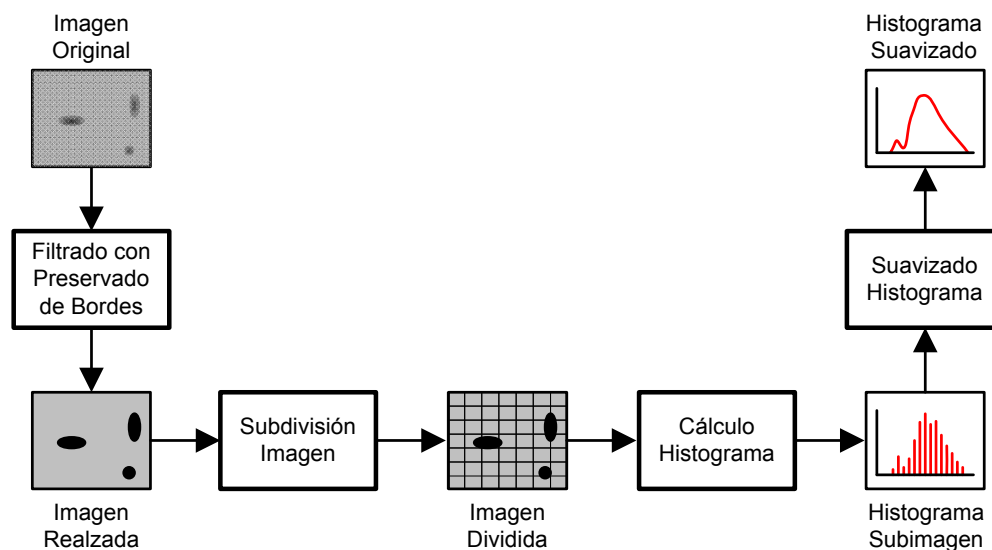


Figura 8.3: Operaciones de la etapa de preprocesamiento.

8.2.1 Suavizado de imagen con preservado de bordes.

Cuando se analizan las imágenes capturadas por la cámara se pueden apreciar variaciones en los valores del nivel de gris entre píxeles vecinos en zonas de la imagen donde, en teoría, no deberían de existir. Éstas pueden estar ocasionadas por las diferencias de ganancia en el sensor de adquisición de imagen, introducido por los elementos de conversión analógico/digital, etc., es decir, existencia de ruido de tipo gaussiano.

Mediante la aplicación de filtros paso bajo se puede eliminar o reducir este tipo de ruido aunque tiene el inconveniente de difuminar o desdibujar ciertas zonas de transición donde existen bordes que, en el caso de la detección de óxido, se corresponderían con zonas donde existen manchas.

Por tanto, interesaría un filtrado paso bajo que no difumine los bordes donde existen manchas de defecto. A este respecto, una buena solución podría ser un *filtro de suavizado con preservado de bordes*⁵ basado en una máscara de convolución bidimensional separable⁶.

La ecuación 8.1 muestra la máscara correspondiente a un filtro paso bajo de orden b normalizado a peso unitario y separable [183]. En este tipo de filtro de media se pondera más el píxel central y los píxeles en cruz manteniendo los píxeles diagonales sin ponderar. Conforme el valor de b aumenta, el efecto de suavizado será más débil ya que el peso del píxel central es más elevado y las diferencias entre éste y los píxeles en cruz crecen.

$$H = \left(\frac{1}{b+2} \right)^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & b & 1 \\ b & b^2 & b \\ 1 & b & 1 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

En la ejecución del filtro de suavizado con preservado de bordes solamente se ha utilizado una única iteración y la condición de varianza que se ha seleccionado para que se aplique la acción de suavizado sobre el píxel es de $\alpha \leq 200$.

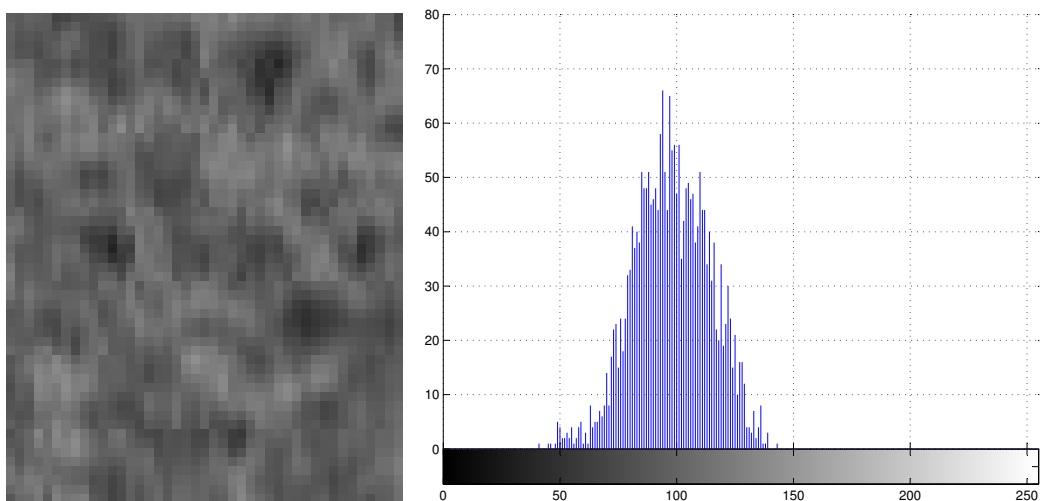
Las figuras 8.4 y 8.5 muestran el resultado sobre la imagen original de un filtrado de preservado de bordes según distintos valores del parámetro b de la máscara de filtrado. También se muestran los histogramas de cada imagen procesada.

En las imágenes procesadas se observa que, conforme se aumenta el grado de suavizado, las zonas de la imagen se homogeneizan más mientras se preservan los bordes de las manchas de óxido. Los histogramas muestran una acentuación progresiva de la zona del histograma correspondiente con las manchas, es decir, se va conformando el lóbulo perteneciente a las manchas en contraste con el lóbulo que agrupa al resto de píxeles de la imagen libre de defecto. A partir de $b = 3$ se comienza a formar el lóbulo correspondiente con las manchas de defecto quedando definitivamente formado para $b = 4$.

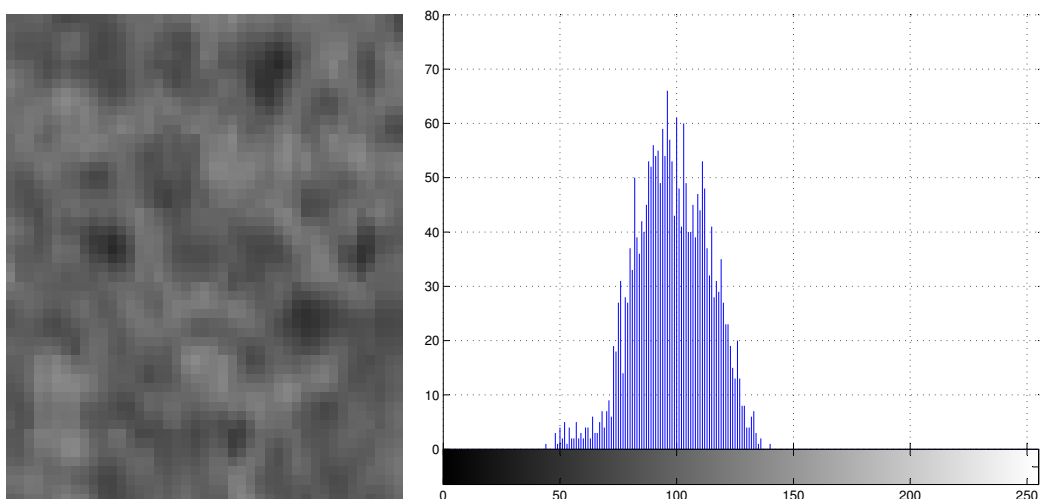
Por tanto, se elegirá $b = 4$ para el filtro.

⁵ El algoritmo de *suavizado con preservado de bordes* se muestra en la sección 4.1.2 del capítulo 4.

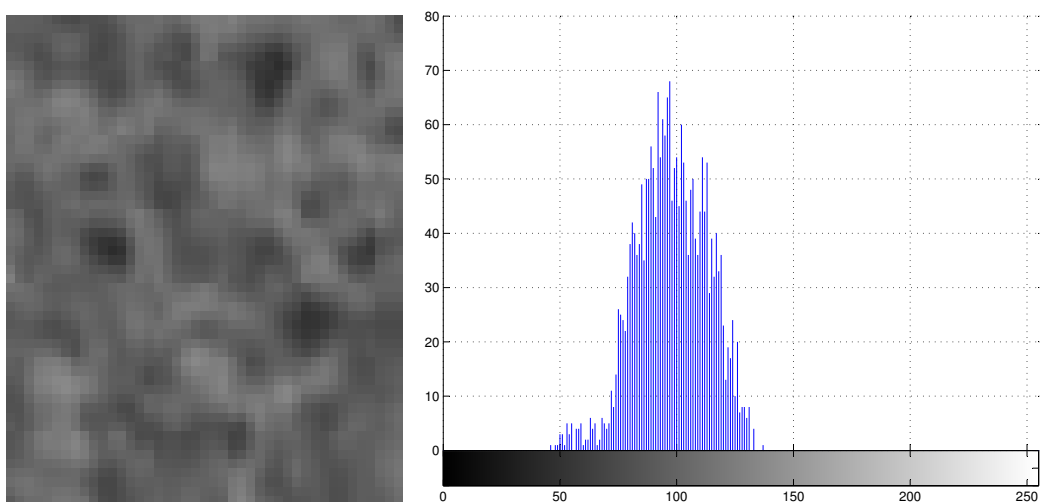
⁶ La convolución bidimensional se puede transformar en una secuencia de dos convoluciones unidimensionales (convolución de todas las filas seguida de una convolución de todas las columnas) cuyo coste computacional es inferior.



(a) Imagen e histograma original.

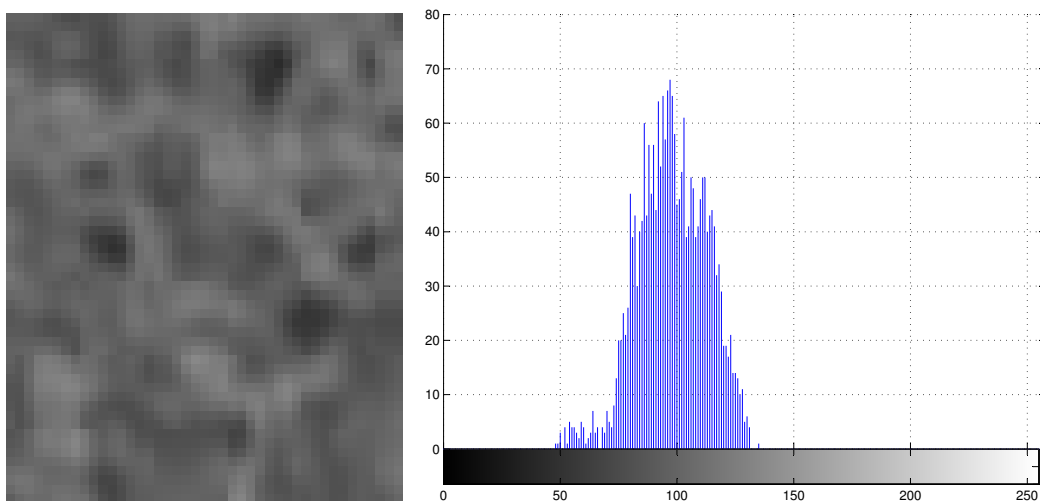


(b) Imagen e histograma filtrado ($b = 6$).

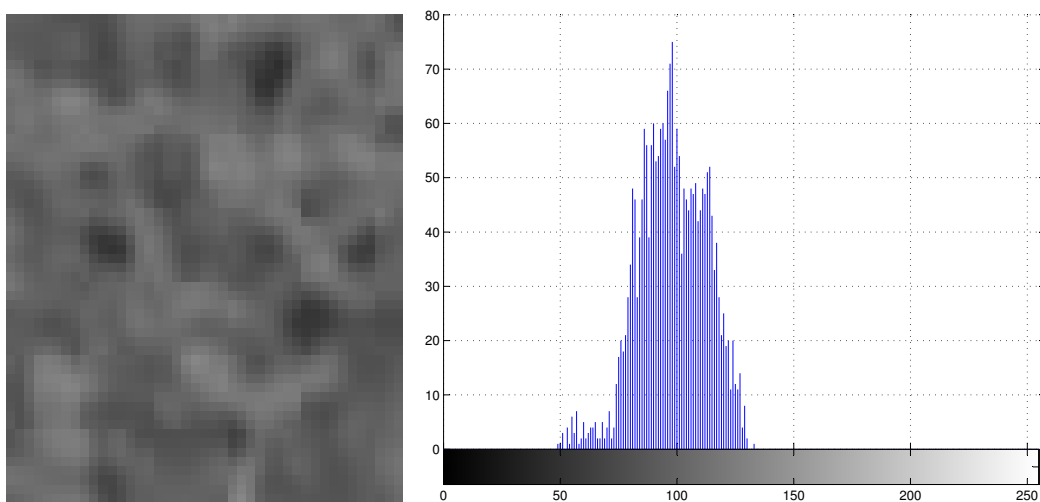


(c) Imagen e histograma filtrado ($b = 5$).

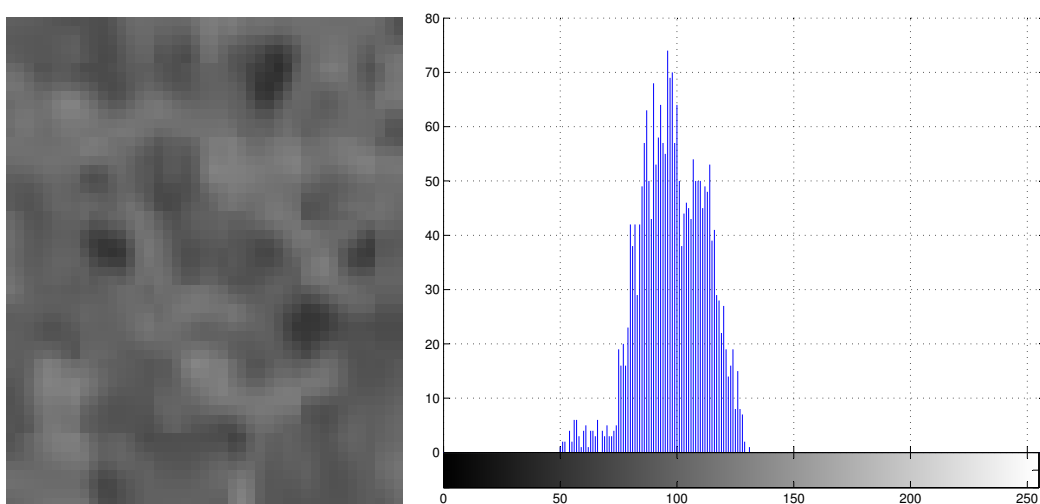
Figura 8.4: Filtro de preservado de bordes (I).



(a) Imagen e histograma filtrado ($b = 4$).



(b) Imagen e histograma filtrado ($b = 3$).



(c) Imagen e histograma filtrado ($b = 2$).

Figura 8.5: Filtro de preservado de bordes (II).

Considerando una imagen de $M \times N$, una máscara de filtrado de $P \times Q$ (3×3) y dos operaciones de convolución bidimensional a realizar para implementar el filtrado con preservado de bordes, el número de operaciones para la realización de este será $N_{Op}=2MNPQ=18MN$. En el caso de implementarlo mediante convoluciones unidimensionales se obtendrá:

$$N_{Op} = 2MN (P + Q) = 12MN \quad (8.2)$$

8.2.2 Subdivisión de la imagen.

Aunque se ha tratado de obtener una iluminación homogénea sobre la superficie a inspeccionar finalmente no ha sido posible conseguirla. Las heterogeneidades introducidas por la desalineación de los componentes ópticos, las reflexiones producidas por la propia topología de la superficie a inspeccionar, el desgaste de las lámparas de los proyectores, manchas de agua sobre la superficie de la banda, etc., han sido imposible evitarlas haciendo inviable el empleo de técnicas de umbralización de tipo global debido a la distorsión que introducen sobre los histogramas de la imagen.

En la sección 4.1.1 del capítulo 4 se mostraron una serie de técnicas para enfrentarse a este problema: sustracción de modelo de iluminación, modelo de iluminación a partir de imagen de referencia, subdivisión de la imagen y filtrado homomórfico.

La aplicación de *la técnica basada en el modelo de iluminación por imagen de referencia no es posible realizarla* debido a la dificultad de reproducir las condiciones de operación del sistema de inspección (superficie curva sometida a vibraciones, ligeras inclinaciones y desplazamientos de la banda perpendicularmente al eje óptico de la cámara, etc.). Las técnicas de *sustracción de modelo de iluminación* y el *filtrado homomórfico* tienen un determinado coste computacional sobre todo esta última.

Finalmente, la *división de la imagen original en pequeñas subimágenes de $m \times n$* (figura 8.6) requiere una selección cuidadosa de las dimensiones de las subimágenes.

Las dimensiones de las subimágenes deberán ser tales que las variaciones de iluminación que puedan existir dentro de ellas no afecten al algoritmo de procesamiento. El empleo de esta técnica introducirá cierto coste computacional ya que de un procesamiento global se pasa a un procesamiento local de la imagen con la consiguiente aparición de posibles problemas derivados de este tipo de procesamiento (diferencia de umbrales entre subimágenes contiguas, manchas de defecto que caen entre dos o más imágenes, etc.).

Para la elección de las dimensiones de las subimágenes primeramente se determinan las dimensiones máximas de una subimagen según un criterio de homogeneidad. Este criterio consiste en considerar que la iluminación en la subimagen es homogénea cuando la variación del valor de la mediana Δm en pequeñas zonas distantes cumple $\Delta m \leq \pm 2$. Según este criterio, las dimensiones máximas que podrían tener las subimágenes son de aproximadamente 100×100 píxeles.

En el cálculo de las dimensiones mínimas de las subimágenes también se impone un criterio basado en las dimensiones de la mancha de óxido más grande a detectar por el sistema.

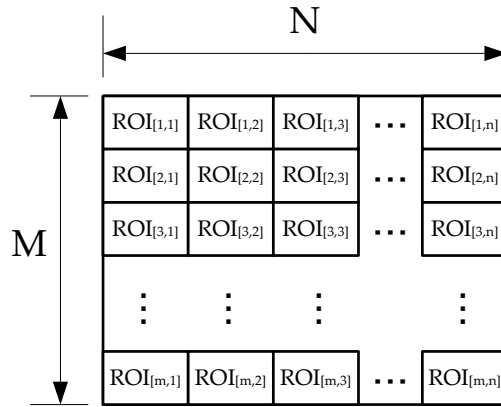


Figura 8.6: Subdivisión de la imagen original.

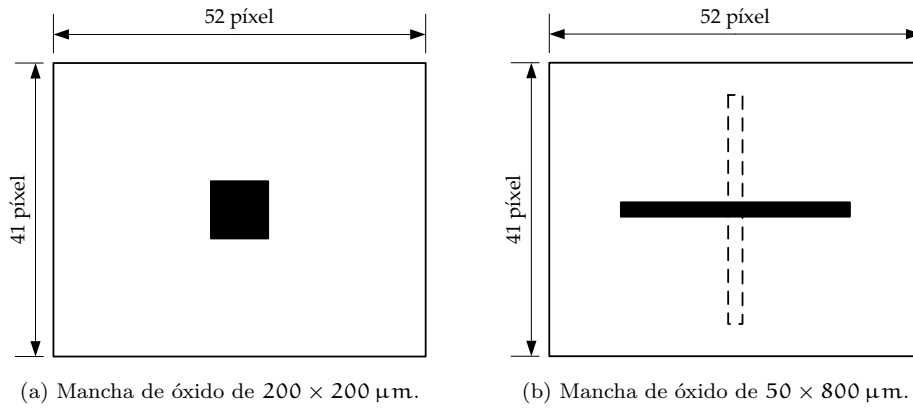


Figura 8.7: Dimensiones subimágenes.

Estas dimensiones eran de $200 \times 200 \mu\text{m}$ para una mancha de forma cuadrada (equivalente a 8×8 píxeles según la resolución espacial $R_s = 0,025 \text{ mm/píxel}$ del sistema⁷). De esta manera, se considera que las dimensiones mínimas de la subimagen deben circunscribir la misma superficie de mancha indicada pero en formato alargado, es decir, una mancha de dimensiones $50 \times 800 \mu\text{m}$ (2×32 píxel).

Con estas dimensiones mínimas y teniendo en cuenta las dimensiones $M \times N$ de la imagen completa, ésta se podría subdividir en 20×20 ($m \times n$) subimágenes de 41×52 píxeles (ver figura 8.7a y 8.7b manchas de óxido cuadradas y alargadas en subimagen).

⁷ Ecuación 7.24 en sección 7.3.2 del capítulo 7.

8.2.3 Cálculo del histograma de las subimágenes.

Una vez dividida la imagen original en 20×20 subimágenes, se procede a calcular el histograma y una serie de índices estadísticos descriptivos de cada subimagen. Estos índices son la mediana $[m]_{ROI}$, la desviación típica $[\sigma]_{ROI}$, el sesgo $[s]_{ROI}$ y la curtosis $[c]_{ROI}$ de los valores de intensidad de los píxeles de cada subimagen siendo fundamentales para el cálculo del umbral de segmentación. Las ecuaciones para el cálculo de los índices se definen en la sección 8.3.2.

8.2.4 Suavizado de histograma.

Los histogramas obtenidos de las subimágenes no resultan ser apropiados para la realización del análisis de su forma durante la etapa de segmentación debido a varias circunstancias:

- Las subimágenes no contienen suficientes píxeles para definir con claridad los niveles de gris del histograma.
- Posible existencia de niveles de gris con valores espúreos. Están formados por niveles de gris cuyas frecuencias son muy diferentes si se comparan con las frecuencias de niveles vecinos.

Mediante un filtrado paso bajo del histograma, las componentes de baja frecuencia permanecerán quedando suavizados aquellos cambios bruscos que se corresponden con las altas frecuencias. El resultado es un histograma suavizado que muestra la tendencia del original y facilita el análisis de forma.

Suavizado mediante filtro FIR.

Los filtros de respuesta finita al impulso (FIR: Finite Impulse Response) son filtros donde cada valor de la secuencia de salida solo depende de un número finito de valores de la secuencia de entrada. Por este motivo, suelen denominarse también de tipo no recursivo puesto que solo las entradas se usan en el filtro. Su proceso de filtrado se asemeja a un filtrado mediante media móvil donde una *ventana* de filtrado se desplaza a lo largo de la función a filtrar.

Tienen ventajas muy interesantes que les hacen ser ampliamente utilizados en múltiples aplicaciones: son estables para cualquier valor de la respuesta de impulso y sus transitorios iniciales tienen duración finita. Otra característica interesante es su facilidad de diseño para conseguir una respuesta en frecuencias de fase lineal por lo que una señal filtrada por este tipo de filtro no será distorsionada. Uno de los inconvenientes del filtro FIR es que requiere, para una misma frecuencia de corte, más coeficientes que los filtros de respuesta infinita al impulso (IIR: Infinite Impulse Response) lo que implica generalmente que tengan un mayor retardo.

La ecuación general unidimensional de un filtro FIR es la siguiente [392, 393]:

$$y(k) = \sum_{i=0}^n b_i \cdot x(k-i) \quad (8.3)$$

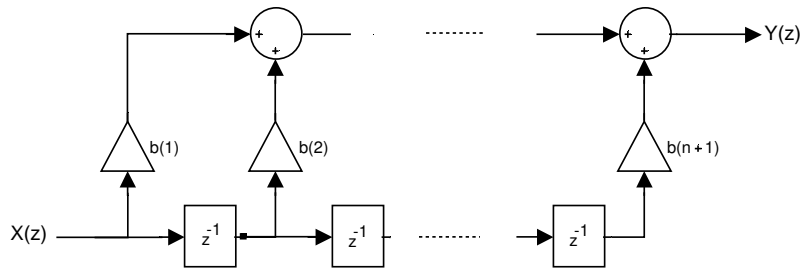


Figura 8.8: Esquema de bloques general de un filtro FIR.

donde b_i son los coeficientes del filtro (también denominada función de ponderación), n es el orden del filtro, $x(k-i)$ son los distintos valores de las entradas e $y(k)$ es la salida del filtro. El carácter lineal de la fase va a producir un desplazamiento de la señal de salida $y(k)$ cuyo retraso θ vendrá en función del número de coeficientes N del filtro ($N = n + 1$):

$$\theta \begin{cases} = \frac{N-1}{2} & \text{si } N \text{ es impar} \\ = \frac{N}{2} - 1 & \text{si } N \text{ es par} \end{cases} \quad (8.4)$$

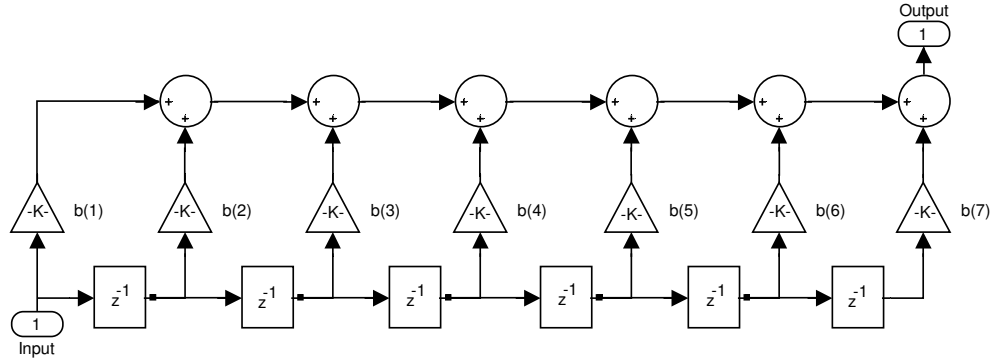
En el dominio de la transformada Z el valor de la salida $Y(z)$ será el producto de la función de transferencia del filtro $H(z)$ por el valor de la entrada $X(z)$ (la figura 8.8 representa el esquema de bloques de los elementos que conforman la ecuación.):

$$Y(z) = H(z) \cdot X(z) = [b(1) + b(2) \cdot z^{-1} + \dots + b(n+1) \cdot z^{-n}] \cdot X(z) \quad (8.5)$$

Este tipo de filtros puede diseñarse analíticamente de dos formas diferentes: definiendo la respuesta en frecuencia del filtro para posteriormente determinar sus coeficientes mediante la transformada inversa de Fourier y mediante el uso de métodos de optimización que modifican los coeficientes del filtro hasta aproximarlo a la respuesta en frecuencia deseada.

La función de Matlab utilizada para la generación de los coeficientes b de un filtro FIR paso bajo de orden O_{FIR} y frecuencia de corte normalizada w_n tiene el siguiente formato:

$$b = \text{fir1}(O_{\text{FIR}}, w_n) \quad (8.6)$$

Figura 8.9: Diagrama del filtro FIR ($O_{FIR} = 6$).

i	1	2	3	4	5	6	7
b(i)	0,0238	0,0930	0,2321	0,3019	0,0238	0,0930	0,2321

Tabla 8.1: Coeficientes b del filtro FIR ($O_{FIR} = 6$).

Considerando el nivel de intensidad máximo \tilde{n}_j y mínimo \check{n}_j del histograma correspondiente con la subimagen j y el orden del filtro seleccionado O_{FIR} , el número de operaciones para la realización del suavizado del histograma j será de:

$$[N_{Op}]_j = \sum_{k=\check{n}_j}^{\tilde{n}_j} \sum_{i=0}^{O_{FIR}} b_i \cdot x(k-i) \quad (8.7)$$

Diseño del filtro y resultados.

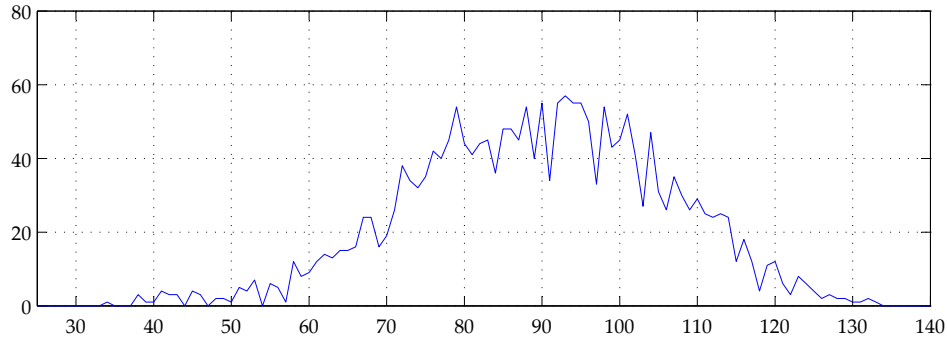
El diseño del filtro FIR se ha realizado bajo el criterio de encontrar el filtro de menor orden que preservando la forma del histograma elimine cambios bruscos en el histograma.

Supóngase un histograma como el resultado de muestrear una señal obteniéndose un marco de 256 muestras (de 0 a 255 niveles de grises) y del cual se desean filtrar cambios bruscos con oscilaciones por encima de una frecuencia de corte f_c . La frecuencia de corte w_n normalizada a la frecuencia de Nyquist requerida por la función `fir1` sería la siguiente:

$$w_n = \frac{f_c}{(256/2) \text{ Hz}} \quad (8.8)$$

Se han analizado distintos valores de orden del filtro O_{FIR} y frecuencia de corte f_c encontrándose más adecuados para el filtro $f_c = 4 \text{ Hz}$ y $O_{FIR} = 6$. La figura 8.9 y la tabla 8.1 muestran el esquema de bloques y los coeficientes del filtro FIR para esta configuración.

Las figuras 8.10 y 8.11 muestran el histograma real y el filtrado para distintos órdenes de filtros comprendidos entre 4 y 7 donde puede observarse como con el incremento del orden se reducen los puntos espúreos del histograma apareciendo con más claridad su tendencia. A partir del orden 6 se aprecia la pérdida de información provocada por un exceso de suavizado.



(a) Histograma real.

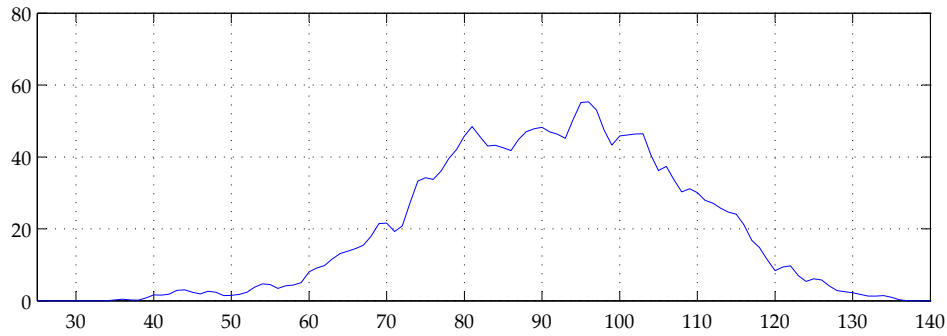
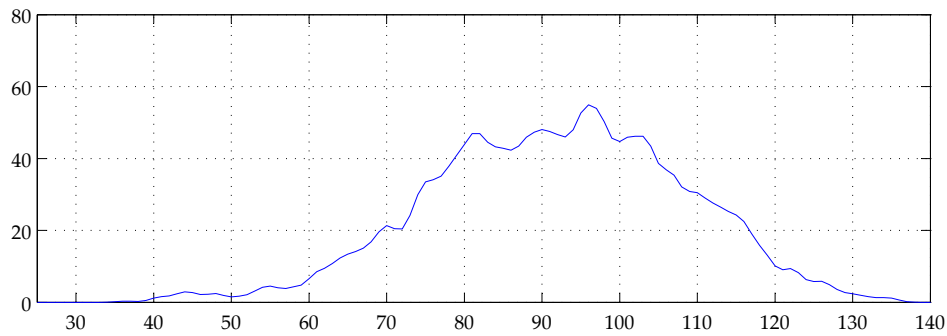
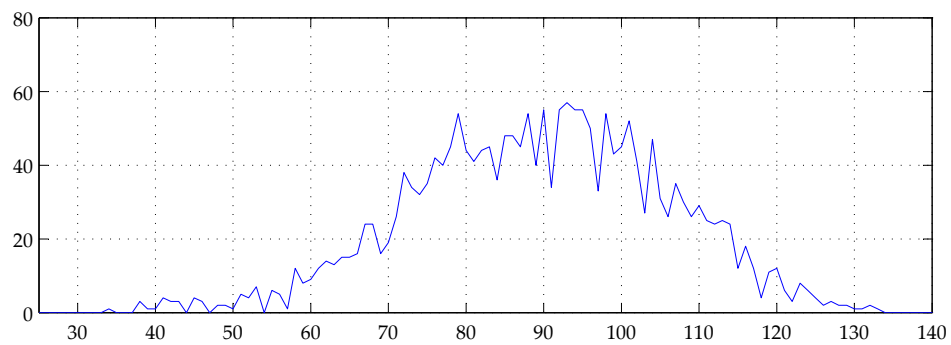
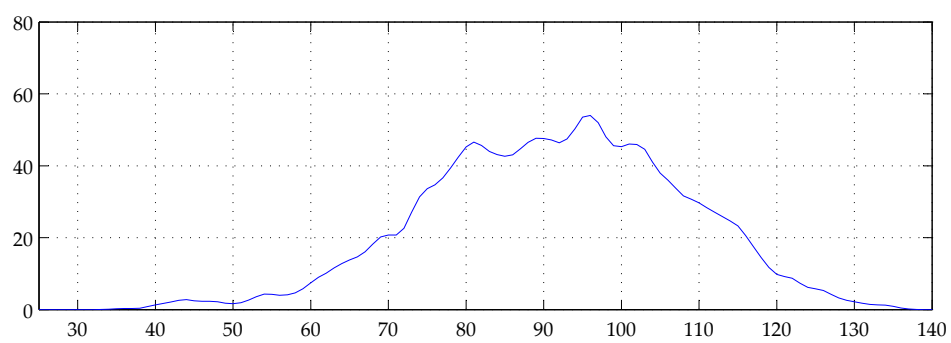
(b) Histograma suavizado ($O_{FIR} = 4$).(c) Histograma suavizado ($O_{FIR} = 5$).

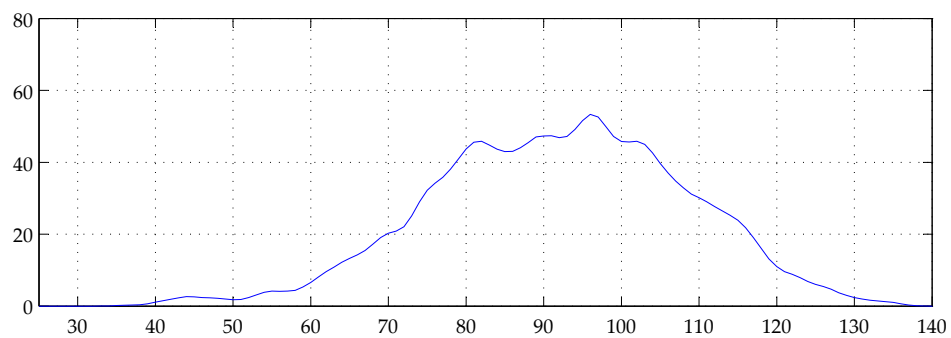
Figura 8.10: Suavizado del histograma mediante filtro FIR ($O_{FIR} = 4$ y 5).



(a) Histograma real.



(b) Histograma suavizado ($O_{FIR} = 6$).



(c) Histograma suavizado ($O_{FIR} = 7$).

Figura 8.11: Suavizado del histograma mediante filtro FIR ($O_{FIR} = 6$ y 7).

8.3 SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN.

Al principio del capítulo, se planteó resolver la detección de óxido residual empleando como técnica de segmentación la umbralización basada en el análisis de forma del histograma de la imagen.

Previamente a la segmentación, se ha adecuado la imagen aplicando una serie de operaciones de preprocesamiento cuyos resultados son el histograma suavizado y una serie de índices extraídos de cada una de las subimágenes en las que se ha dividido la imagen.

El objetivo de esta etapa será encontrar sobre el histograma suavizado el umbral T que discrimina aquellos píxeles considerados como defecto de los que se corresponden con superficie libre de defecto. No todas las subimágenes procesadas contendrán defectos y, en éstas, el umbral encontrado deberá asignar todos los píxeles a la clase que considera la superficie libre de defecto.

La secuencia básica a realizar para la segmentación de una subimagen va a estar compuesta de las siguientes operaciones (figura 8.12):

- Construcción de *modelo matemático empírico* para la determinación de umbral origen de búsqueda U_e^* del nivel de umbral T para la binarización de la subimagen.
- Determinación del *rango dinámico acotado* de búsqueda del umbral T ($[n_{\min}, n_{\max}]$).
- *Búsqueda* del umbral T dentro del rango dinámico del histograma de la subimagen.
- *Binarización de la subimagen*.

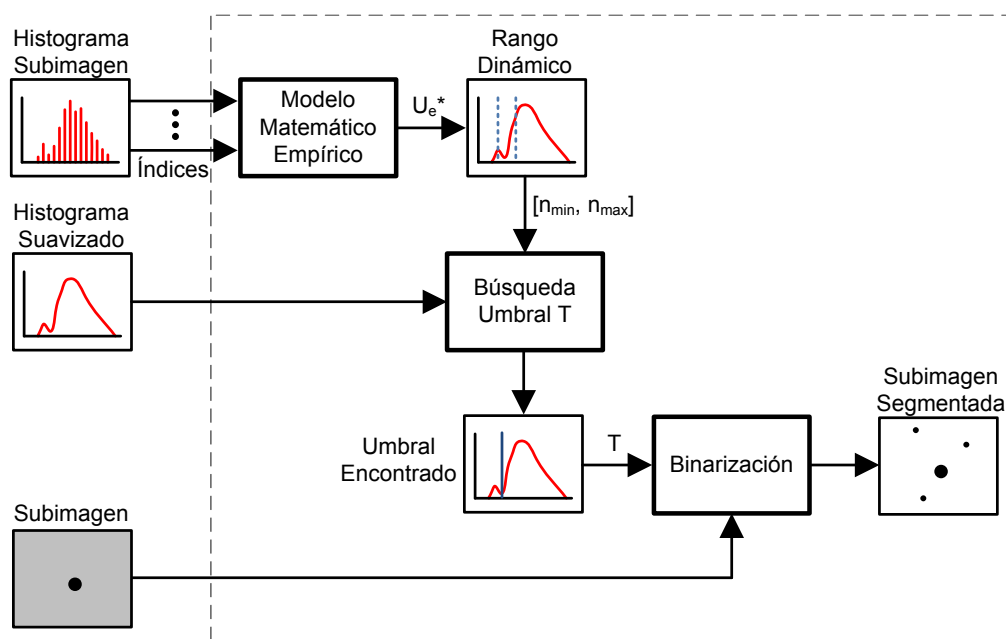


Figura 8.12: Operaciones realizadas durante la etapa de segmentación.

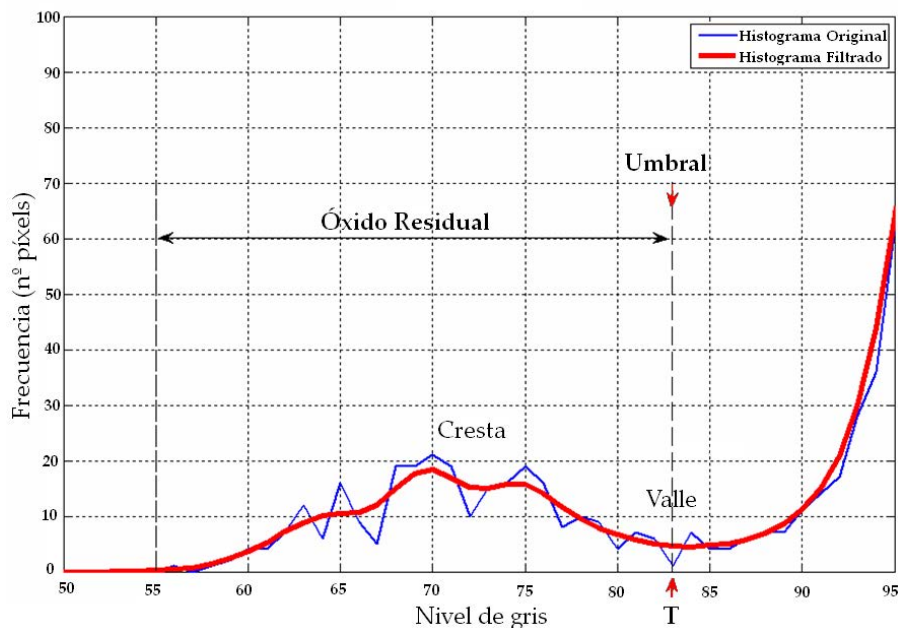


Figura 8.13: Óxido residual en el histograma.

8.3.1 Estrategia de umbralización.

Mediante las técnicas de preprocesamiento se ha tratado de eliminar el ruido y realzar los defectos en la imagen tratando de acercar el histograma de una subimagen que contiene defecto al histograma ideal (ver figura 8.2 en sección 8.1.1). De esta manera, las subimágenes que contienen manchas de defecto presentarán un histograma compuesto por dos lóbulos donde el lóbulo menor se corresponde con aquellos píxeles que conforman manchas de óxido y el lóbulo mayor con los pertenecientes a la superficie libre de defecto.

El umbral T buscado que discrimina aquellos píxeles que contienen defecto de los que no estará dentro del valle formado por los dos lóbulos descritos (figura 8.13). En la práctica, la búsqueda del umbral T no es tan evidente debido a una serie de circunstancias:

- No tiene por qué haber un único valle sino que puede haber varios.
- Los valles encontrados pueden tener diferente profundidad.
- Puede que el mínimo del valle o valles encontrados no coincida con un valor de frecuencia de píxeles nulo.
- La distancia entre los lóbulos es variable.
- El histograma de la subimagen puede estar desplazado por diversas causas:
 - Reflectividad del acero (tipos y/o acabados de acero distintos).
 - Manchas de agua.
 - Otros tipos de defectos sobre la superficie (marcas, arañazos, etc.).
 - Nivel de iluminación en la subimagen.

Una vez puesto de manifiesto ciertos inconvenientes respecto al umbral T , la cuestión siguiente es qué estrategia de búsqueda se va a establecer para encontrarlo.

Una estrategia básica podría buscar el umbral T analizando la forma del histograma en todo su rango dinámico, es decir, entre el primer y el último nivel de gris que contiene algún pixel.

En cambio, se podría optimizar esta búsqueda y, a la vez, hacerla más robusta reduciendo previamente el rango dinámico de búsqueda del umbral T dentro del histograma. Cuanto más se logre acotar el rango de búsqueda tanto menor será la casuística a la que enfrentarse y más probabilidades de éxito se podrán tener para encontrar el umbral de discriminación más adecuado.

Pero, ¿cómo se puede conseguir acotar el rango dinámico de búsqueda del umbral T ? El siguiente apartado tratará de aportar una solución.

8.3.2 Umbral empírico de búsqueda para la umbralización.

Un primer paso para determinar el umbral T utilizado para la segmentación de la imagen es acotar el espacio donde se va a realizar su búsqueda dentro del histograma de la subimagen, es decir, determinar un rango de máxima pertenencia.

Se aplicará una metodología heurística cuyo resultado es la obtención de un umbral empírico origen el cual determinará el rango de valores de intensidad donde realizar la búsqueda final del umbral T . Es decir, se plantea aplicar la heurística como una solución aproximada inicial sobre la que apoyarse para obtener la solución óptima final.

Esta metodología va a estar basada en el aprovechamiento del conocimiento del experto en detección de óxido residual para la creación de un modelo matemático empírico que pronostique el umbral origen a partir de observaciones o experimentos.

Las observaciones forman parte de la etapa de adquisición del conocimiento cuyo objetivo será presentar al experto una serie de imágenes que contienen defectos de óxido residual para:

- Identificar las manchas de óxido residual dentro de la imagen.
- Determinar el umbral que discrimina de forma adecuada las manchas de óxido del acero inoxidable.
- Extraer de las imágenes información estadística en forma de índices.

Una vez realizada la adquisición del conocimiento, se construirá el modelo matemático empírico, se validará y se analizarán los resultados. La construcción del modelo va a realizarse mediante dos tipos de metodologías distintas: métodos basados en *regresión lineal múltiple* y basados en *redes neuronales*.

Cada tipo de modelo se analizará inicialmente por separado para, en una segunda etapa, poder realizar una comparativa que ayude a seleccionar el más apropiado. Para ello, se han establecido unos índices sencillos e intuitivos que ayudan a seleccionar, con la mayor objetividad posible, el modelo más apropiado. Son los siguientes⁸:

- Error absoluto medio (EAM).
- Error absoluto máximo ($EA_{M_{\max}}$).
- Desviación típica del error absoluto medio (σ_{EAM}).

Adquisición del conocimiento.

La adquisición de conocimiento se va a realizar mediante el análisis, por un experto en el dominio de la detección de manchas de óxido residual, de imágenes adquiridas por el sistema que contienen manchas de defecto.

El conjunto de imágenes mostradas al experto pertenecen a una amplia variedad de aceros de tipo austenítico y ferrítico con diferentes acabados superficiales (*ASTM* 301, 304 304 L, 304 DDQ, 309 S, 310 S, 316, 316 L, 316 Ti, 321, 409 L, 430, 430 Ti, 430 Nb, 434, etc.). Es decir, se trata de mostrar al experto una muestra representativa de imágenes de todos los tipos de acero inoxidable que son procesados en la línea de recocido y decapado.

Dentro de estas imágenes, el experto seleccionará manchas de óxido residual de las que se extraerán una región de interés de 41×52 píxeles que circunscribe a cada mancha.

El conjunto de imágenes que se han extraído conforman una población de 1774 casos o muestras de regiones de interés ROI lo suficientemente grande como para poder abordar la construcción de los modelos.

Posteriormente, se presentará al experto cada una de estas subimágenes para determinar el umbral óptimo que separa perfectamente la mancha de óxido de la superficie de acero. Este umbral determinado por el experto se denomina umbral empírico real $[U_e]_{\text{real}}$ y se considerará la *variable dependiente* del modelo matemático.

Además de este umbral, se extraerá de cada subimagen información en forma de índices estadísticos descriptivos. Los índices extraídos son la mediana $[m]_{ROI}$, la desviación típica $[\sigma]_{ROI}$ (ecuación 8.10), el sesgo $[s]_{ROI}$ (ecuación 8.11) y la curtosis $[c]_{ROI}$ (ecuación 8.12) y serán consideradas las *variables independientes* del modelo matemático.

La elección de las variables independientes del modelo matemático no se ha realizado al azar sino que se han escogido en función de una serie de características observadas tras analizar la forma de los histogramas de imágenes pertenecientes a diferentes tipos de acero y acabados superficiales (figura 8.14). En concreto se hicieron las siguientes observaciones:

- Superficies de acero donde predominan los valles frente a las crestas presentan histogramas *sesgados* a la izquierda y, al contrario, si predominan las crestas estarán sesgados a la derecha.
- Superficies con grandes diferencias de altura entre valles y crestas presentan un mayor número de niveles de grises (mayor contraste) que queda reflejado en valores de *desviación típica* mayores y *curtosis* de tipo platicúrtica (histograma extendido), y al contrario, diferencias de altura pequeñas obtienen valores de la desviación típica pequeños y curtosis tipo leptocúrtica (histograma con pico pronunciado).

⁸ En la sección F.1 del apéndice F vienen definidas las ecuaciones para el cálculo de estos índices.

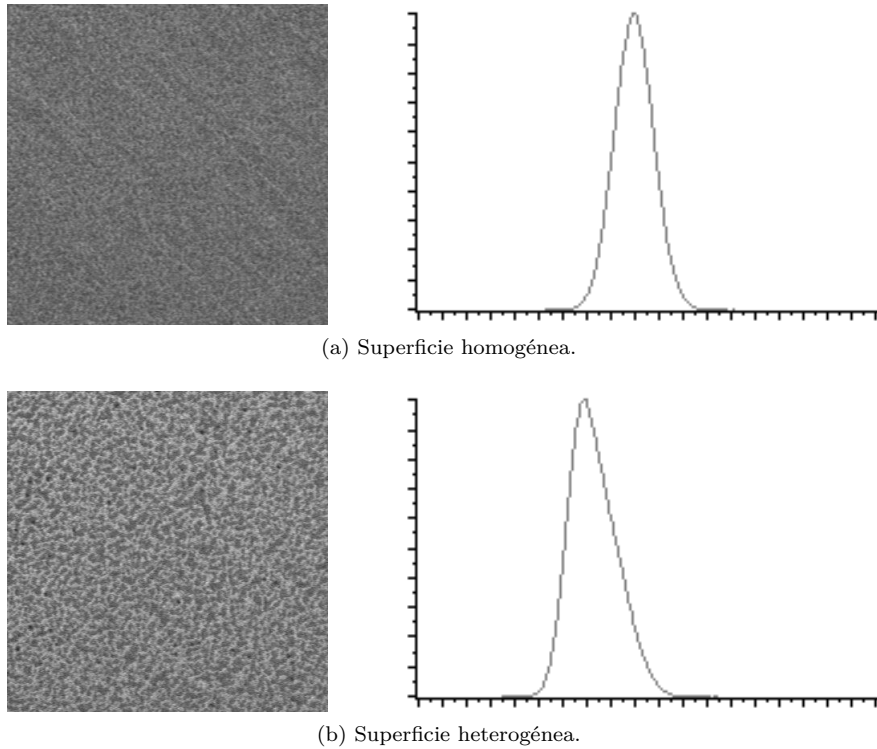


Figura 8.14: Análisis de la forma de histogramas.

- Las características de los distintos tipos de aceros y acabados originan histogramas de imágenes cuyos valores centrales se desplazan sobre el eje del nivel de gris en un sentido u otro. El desgaste progresivo de las lámparas del sistema de iluminación causa también desplazamientos de los histogramas, en este caso, hacia niveles más bajos. Una de las formas con la que se puede determinar estos desplazamientos es con el estadístico *mediana*.

Considerando x_i el valor del nivel de gris de un píxel perteneciente a la subimagen donde $i = 1, 2, \dots, N$ siendo N el número total de píxeles de la subimagen, el valor de la media μ de la subimagen es:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (8.9)$$

Para el cálculo de la mediana de la subimagen $[m]_{ROI}$ se ordenan los píxeles de la subimagen por niveles de gris en orden ascendente y se selecciona aquel que coincide con el número de orden $(N/2) + 1$ (debido a que el número total de píxeles de la subimagen es impar). Éste será el valor de la mediana de la subimagen. La mediana se ha elegido frente a la media debido a su poca sensibilidad a los valores extremos de los píxeles de las subimágenes.

$$[\sigma]_{ROI} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (8.10)$$

$$[s]_{ROI} = \frac{1}{N \cdot [\sigma]_{ROI}^3} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 \quad (8.11)$$

$$[c]_{ROI} = \frac{1}{N \cdot [\sigma]_{ROI}^4} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 - 3 \quad (8.12)$$

Modelo matemático empírico basado en regresión lineal múltiple.

La creación del modelo matemático empírico va a estar basado en el procedimiento de regresión lineal múltiple donde el modelo va a representar un hiperplano en un espacio multidimensional que predice el valor de la variable dependiente en función de una serie de variables independientes de entrada.

La ecuación del modelo de regresión lineal será por tanto:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_k \cdot X_k + \varepsilon \quad (8.13)$$

De esta manera, la variable dependiente Y se interpreta como una combinación lineal de un conjunto de k variables independientes X_k multiplicadas por unos coeficientes β_k que representan el peso relativo de la variable dentro de la ecuación. El modelo incluye además una constante β_0 y un componente aleatorio ε o residuos que acumulará todo aquello que no pueda ser explicado por las variables independientes.

Al tratarse de un modelo estadístico, se basa en una serie de supuestos de linealidad, independencia, normalidad, homocedasticidad y no-colinealidad (ver descripción en apéndice F, sección F.3.1).

Los términos del modelo de regresión son poblacionales por lo que hay que estimarlos minimizando la suma de las diferencias elevadas al cuadrado entre los valores observados Y y los pronosticados \hat{Y} :

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_k \cdot X_k \quad (8.14)$$

k	β_k	BETA
0	10,144	-
1	0,801	0,966
2	-0,956	-0,259
3	-1,041	-0,172
4	1,347	0,084

(a) Coeficientes del modelo.

EAM	EAM _{MAX}	σ_{EAM}	$3 \cdot \sigma_{\text{EAM}}$
2,07	12,99	1,63	4,89

(b) Índices estadísticos del error.

Tabla 8.2: Resultados del modelo matemático de regresión lineal.

La variable dependiente es el umbral empírico real u observado $[U_e]_{\text{real}}$ determinado por el experto para cada uno de los casos mientras que las variables independientes son la mediana $[m]_{\text{ROI}}$, la desviación típica $[\sigma]_{\text{ROI}}$, el sesgo $[s]_{\text{ROI}}$ y la curtosis $[c]_{\text{ROI}}$. De esta manera, la ecuación 8.14 quedaría como:

$$[U_e]_{\text{pron}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot [m]_{\text{ROI}} + \beta_2 \cdot [\sigma]_{\text{ROI}} + \beta_3 \cdot [c]_{\text{ROI}} + \beta_4 \cdot [s]_{\text{ROI}} \quad (8.15)$$

donde $[U_e]_{\text{pron}}$ es el umbral empírico pronosticado o predicho por el modelo.

El modelo matemático empírico ha sido construido utilizando la herramienta de IBM SPSS versión 23. La creación, el desarrollo, la obtención de resultados y la validación del modelo viene desarrollado en el apéndice F, sección F.3.

Los resultados obtenidos para los coeficientes β_k (coeficientes no estandarizados) y los coeficientes BETA (coeficientes estandarizados) vienen mostrados en la tabla 8.2a.

Los coeficientes BETA son comparables entre sí indicando el peso relativo que cada coeficiente aporta al modelo. *De esta manera, como puede observarse, la mediana es la variable independiente que más aporta al modelo (0,966), seguida de la desviación típica (-0,259) y de la curtosis (-0,172). La influencia del sesgo en el modelo es prácticamente nula.*

Respecto a la bondad de la regresión obtenida, el valor de la R^2 ajustada ha sido de 0,807 un valor bastante elevado que sugiere un modelo que predice de manera correcta el umbral.

La validez del modelo (verificación de inviolabilidad de las hipótesis sobre las que se basa el modelo lineal a partir del análisis de los residuos) también se ha estudiado resultando un modelo válido y que realiza buenos pronósticos del umbral incluso para familias de aceros inoxidables diferentes como son los austeníticos y ferríticos (para la construcción del modelo lineal no se separaron los casos).

Los resultados de los índices comparativos obtenidos por el modelo se muestran en la tabla 8.2b. El valor $3 \cdot \sigma_{\text{EAM}}$ indica que en el 99,73 % de la población se obtendrían unos valores de umbral pronosticados por el modelo que caen dentro del rango $\pm 4,89$ entorno al error EAM.

La figura 8.15 muestra la representación gráfica de los valores pronosticados obtenidos por el modelo $[Ue]_{\text{pron}}$ y el umbral empírico observado por el experto $[Ue]_{\text{real}}$ frente al número de casos ordenados por orden creciente de $[Ue]_{\text{real}}$.

El el gráfico se puede observar que el modelo ajusta correctamente entre los niveles de umbral comprendidos entre 59 y 66 (números de casos 450 y 1450 respectivamente). Por debajo del umbral 59, se observa una tendencia al error positivo y por encima del 66 una tendencia al error negativo lo que indica que el modelo lineal no ajusta del todo bien para estos valores extremos de umbral. También se pueden observar dos casos con valores pronosticados que se salen de la pauta común y que dan la impresión de ser anómalos (entorno a los casos 310 y 510). Si se eliminan estos valores extremos, se obtendría un $EA_{\text{MAX}} = 10,51$.

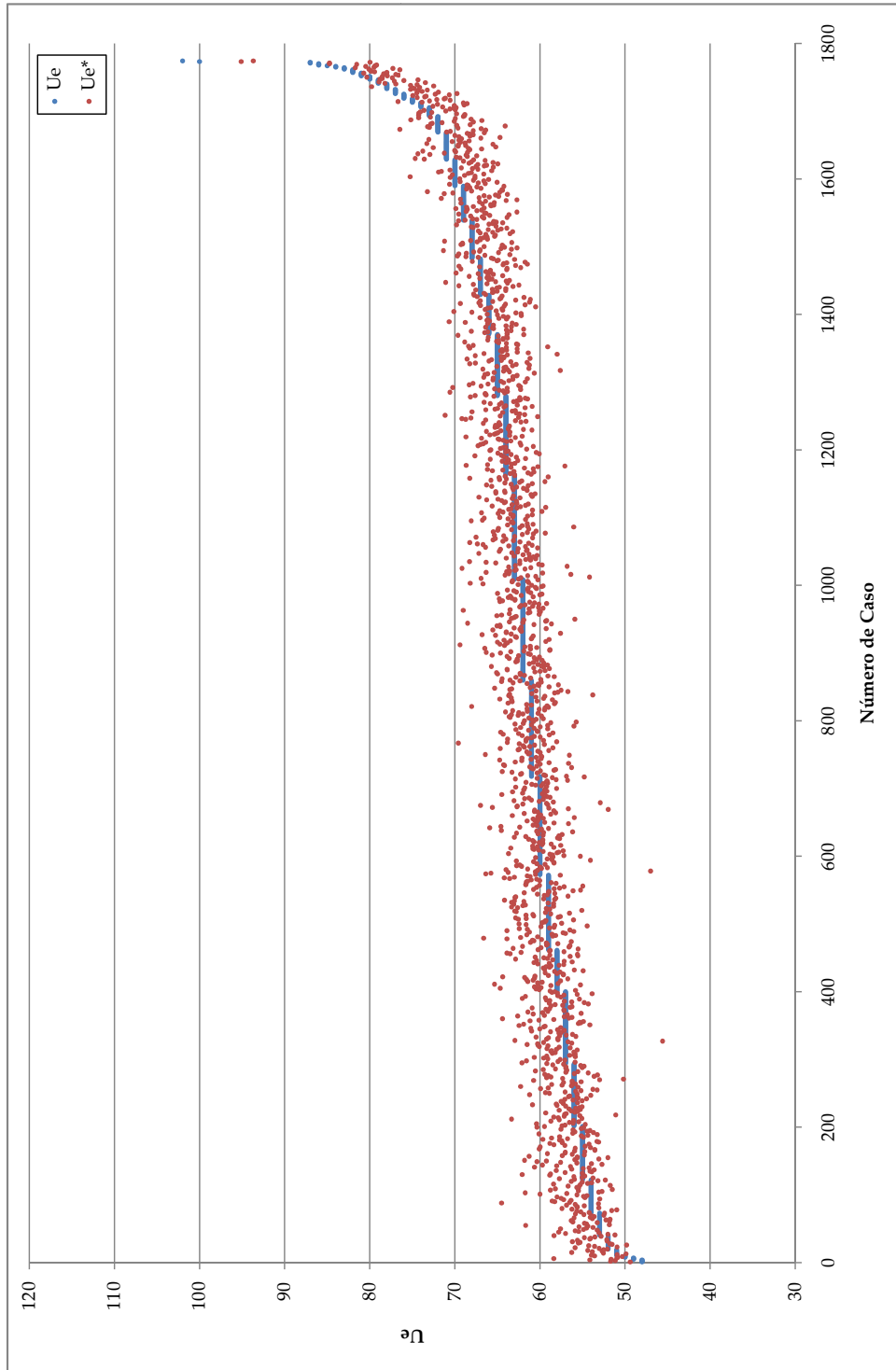


Figura 8.15: Gráfico $[Ue]_{\text{pron}}$ y $[Ue]_{\text{real}}$ frente al número de casos.

Modelo matemático empírico basado en red neuronal.

La creación del modelo matemático basado en redes neuronales tratará, del mismo modo que el de regresión lineal, de construir una función que pronostique el umbral empírico $[Ue]_{\text{pron}}$ a partir de una serie de variables de entrada (mediana, desviación típica, curtosis y sesgo), es decir, va a requerir una red neuronal que actúe como *aproximador funcional universal* [64].

La arquitectura neuronal elegida para la construcción⁹ del modelo es un *perceptrón multicapa*¹⁰ [63], con cuatro variables de entrada, una única capa oculta con un determinado número de neuronas y una única salida. Las funciones de transferencia seleccionadas para las neuronas que componen la capa oculta es la *tangente hiperbólica* y para la neurona de salida la *función lineal*. (ver figuras 2.6d y 2.6b en capítulo 2, sección 2.3.4)

El objetivo es construir el modelo neuronal, basado en la arquitectura propuesta, que tenga el menor número de neuronas posible en la capa oculta, obtenga los mejores índices comparativos y pronostique o generalice bien a partir de nuevos casos o muestras.

Para ello, la metodología de entrenamiento utilizada en la creación del modelo está basada en el método de *validación cruzada* [394] donde se dividirá aleatoriamente el total del número de casos en tres poblaciones distintas:

- Población de entrenamiento (80 % de los casos). Población para el entrenamiento de la red neuronal.
- Población de validación (10 % de los casos). Población para el ajuste de la red neuronal.
- Población de prueba, test o generalización (10 % de los casos). Población dedicada a la estimación del error de generalización.

El *entrenamiento de la red* se realizará mediante el aprendizaje basado en el algoritmo de *Levenberg-Marquardt* [395] que, aunque requiere un mayor uso de la memoria, tiene una gran velocidad de convergencia.

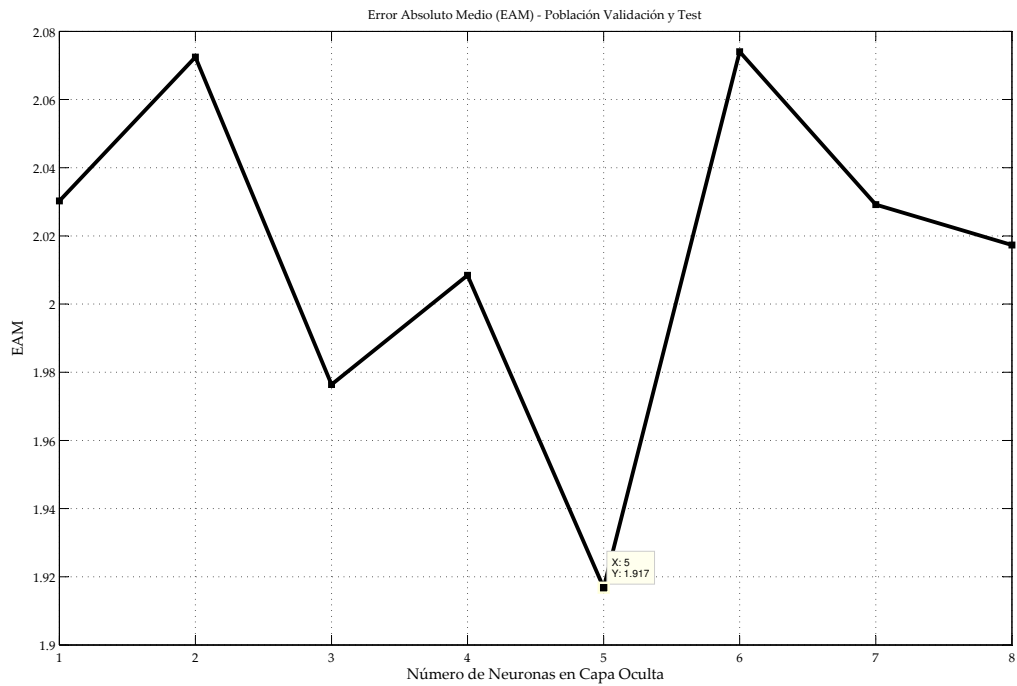
Posteriormente se realizará un *procedimiento de refinado* mediante la *poda* [396] de la red donde se eliminarán aquellas conexiones y unidades de proceso que se consideren poco relevantes (conexiones con pesos sinápticos de pequeña magnitud, conexiones que no afectan significativamente a la salida de la red y eliminación de entradas que producen cambios poco significativos en la salida de la red).

Las figuras 8.16a y 8.16b muestran los errores EAM y EA_{Max} obtenidos por el perceptrón multicapa en función del número de nodos de la capa oculta.

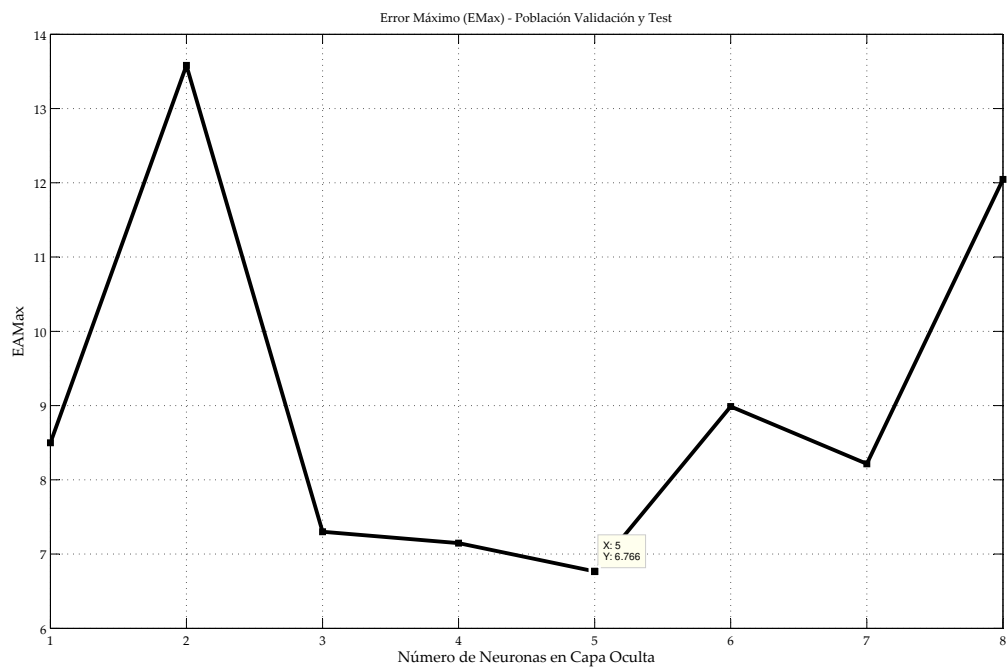
Se puede observar que el error comienza con un valor elevado que va decreciendo hasta alcanzar un mínimo, tras el cual, vuelve a incrementarse de nuevo. Los mejores resultados se obtienen para el modelo con 5 nodos donde se obtienen $EAM = 1,917$ y $EA_{\text{Max}} = 6,766$. La arquitectura del modelo matemático empírico basado en el perceptrón multicapa con 5 nodos en la capa oculta se muestra en la figura 8.17.

⁹ Se ha utilizado la herramienta de diseño de redes neuronales de Matlab [62].

¹⁰ Este tipo de red neuronal se explica detalladamente en el capítulo 2, sección 2.3.4. Su arquitectura se muestra en la figura 2.7.



(a) EAM.



(b) EA_{Max} .

Figura 8.16: Errores según el número de nodos en la capa oculta.

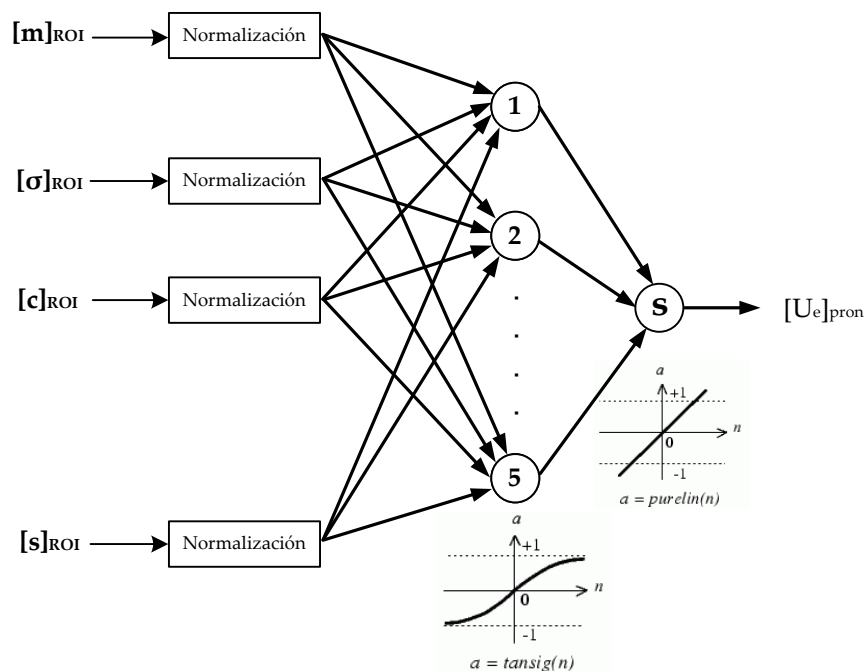


Figura 8.17: Arquitectura del perceptrón multicapa.

EAM	EA _{MAX}	σ _{EAM}	3 · σ _{EAM}
1,92	6,76	1,47	4,41

Tabla 8.3: Índices estadísticos del error (modelo neuronal).

En el apéndice F sección F.4, se analiza la evolución de los errores cuadráticos medios de la población de entrenamiento, validación y test frente al número de épocas de entrenamiento (ver figura F.18a de la sección referida). En este gráfico se observa como los errores decrecen conforme avanza el entrenamiento hasta alcanzar finalmente unos valores de error estables en todas las poblaciones. *El análisis de post-entrenamiento (figura F.18b) muestra un coeficiente de regresión elevado $R = 0,902$ entre la salida de la red $[Ue]_{\text{pron}}$ (A) y los patrones de entrenamiento $[Ue]_{\text{real}}$ (T).*

Por último, la figura 8.18 muestra los $[Ue]_{\text{pron}}$ (Ue^) y $[Ue]_{\text{real}}$ (Ue) frente al número de casos ordenados ascendentemente según los valores del $[Ue]_{\text{real}}$ donde se puede observar que el modelo ajusta correctamente entre los niveles de umbral comprendidos entre 58 y 63 (números de casos 70 y 240 respectivamente). Por debajo del umbral 58, se observa una tendencia al error positivo y por encima del 63 una tendencia al error negativo lo que indica que el modelo neuronal, al igual que el lineal, no ajusta del todo bien para estos valores extremos de umbral. En general, no se observan valores pronosticados que se salgan de lo común (outliers).*

Respecto a los índices comparativos del modelo se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 8.3.

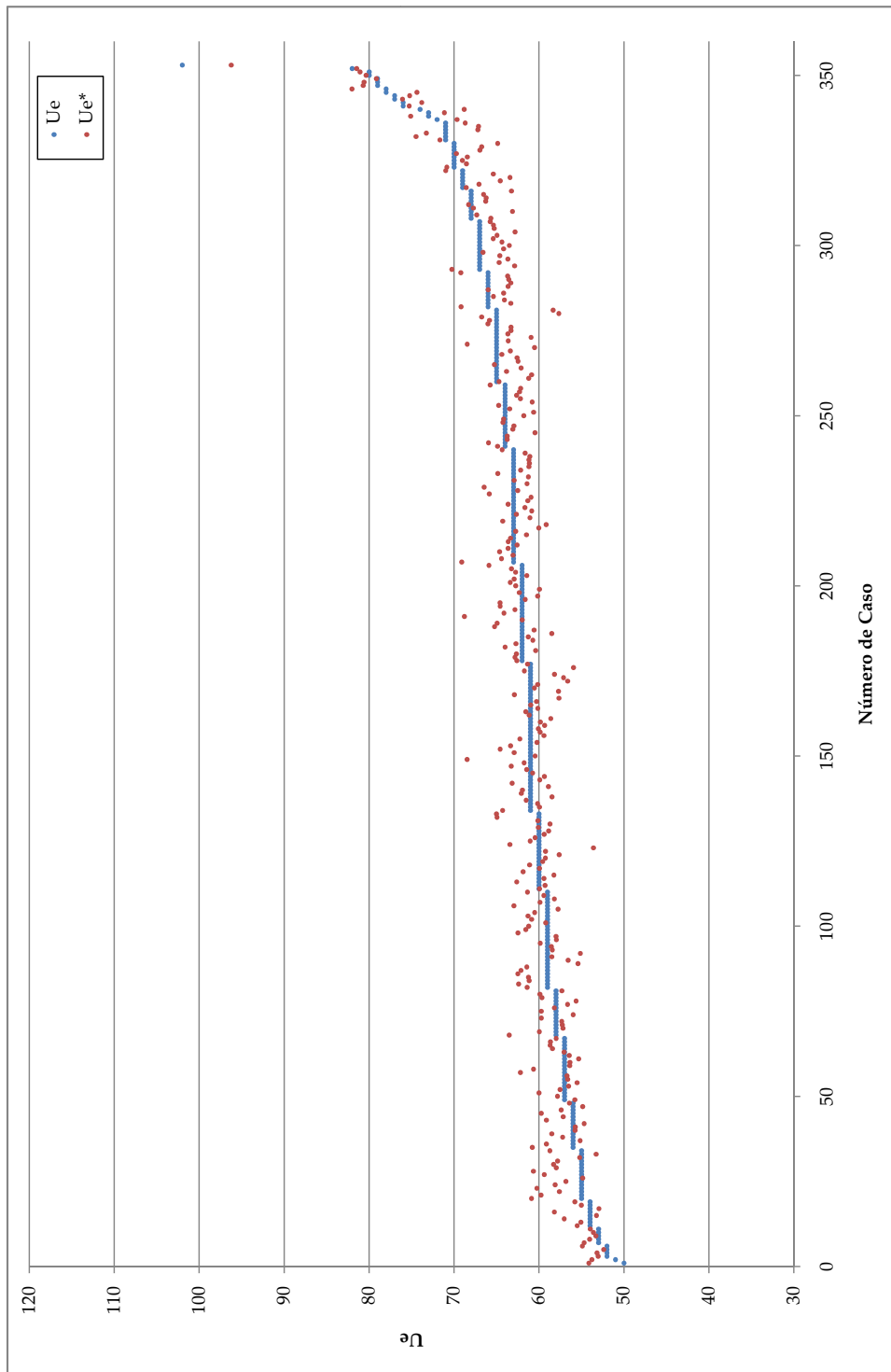


Figura 8.18: Gráfico $[U_e]_{\text{pron}}$ y $[U_e]_{\text{real}}$ frente al número de casos.

El modelo neuronal propuesto, basado en un perceptrón multicapa con 5 nodos en la capa oculta, predice el umbral empírico teórico $[Ue]_{\text{pron}}$ a partir de las variables independientes consideradas realizando unos buenos pronósticos del umbral y generalizando bien para todas las familias de aceros inoxidables (no se separaron las poblaciones).

Comparación de los modelos matemáticos empíricos.

Tras el análisis de los resultados obtenidos por cada modelo (tabla 8.4) se observa que el modelo matemático empírico neuronal obtiene ligeramente mejores resultados que el lineal. Aunque hay una característica de relevancia observable en la figura 8.18: hay menos valores pronosticados extremos. Este hecho también queda reflejado en el EA_{MAX} teniendo un valor de 10,51 en el lineal y 6,76 en el neuronal.

Esta característica resulta de interés ya que, aunque el modelo neuronal no mejora mucho el comportamiento predictivo general con respecto al lineal, sí que resulta ser más estable en el sentido de acotar aún más aquellos valores pronosticados por el modelo considerados como extremos.

Por tanto, se elige el modelo matemático empírico basado en redes neuronales como el modelo a implementar para la obtención del umbral empírico origen de búsqueda del umbral definitivo para la operación de umbralización.

Modelo	EAM	EA_{MAX}	σ_{EAM}	$3 \cdot \sigma_{\text{EAM}}$
Lineal	2,07	10,51	1,63	4,89
Neuronal	1,92	6,76	1,47	4,41

Tabla 8.4: Índices estadísticos del error (ambos modelos).

8.3.3 Determinación del umbral.

La determinación del nivel de umbral T utilizado para la binarización posterior de la subimagen va a ser una simple búsqueda dentro del rango dinámico del histograma suavizado del nivel de gris que se corresponde con el valle más profundo. En caso de no encontrar ningún valle se considerará que la imagen no contiene manchas de defecto y se asignará como nivel de umbral T el valor mínimo del nivel de gris de la subimagen.

En la sección anterior se ha determinado, mediante la red neuronal propuesta, el nivel de gris del valor central del rango correspondiente con el umbral empírico origen de búsqueda $[Ue]_{\text{pron}}$. Los resultados del error obtenidos en la predicción de $[Ue]_{\text{pron}}$ a partir del modelo matemático empírico neuronal van a servir de base para poder determinar los valores del rango dinámico de búsqueda. Dentro de este rango se tendrá la máxima probabilidad de encontrar el umbral T . A partir de ahora, el rango dinámico va a definirse como $[n_{\min}, n_{\max}]$ y estará acotado por los valores n_{\min} y n_{\max} correspondientes con el menor y mayor nivel de gris respectivamente.

Analizando los errores producidos en el modelo neuronal (tabla 8.3) se observa un $EAM=1,92$ y un valor de $3 \cdot \sigma = 4,41$. Este último se corresponde con un nivel de confianza del 99,73 %, es decir, se dispone de una probabilidad del 99,73 % de los valores pronosticados se encuentren dentro de este intervalo.

Teniendo en cuenta el valor obtenido para el $[Ue]_{\text{pron}}$, el EAM y $3 \cdot \sigma$ se podría definir el rango dinámico de la siguiente manera:

$$[n_{\min}, n_{\max}] = [[Ue]_{\text{pron}} - (EAM + 3 \cdot \sigma), [Ue]_{\text{pron}} + (EAM + 3 \cdot \sigma)] \quad (8.16)$$

Aplicando los valores resultados de EAM y $3 \cdot \sigma$ del modelo neuronal el rango dinámico quedaría de la siguiente manera:

$$[n_{\min}, n_{\max}] = [[Ue]_{\text{pron}} - 6,33, [Ue]_{\text{pron}} + 6,33] \quad (8.17)$$

Al tratar en el histograma con números enteros y, relajando un poco la probabilidad, el rango dinámico quedaría definitivamente establecido como $[Ue]_{\text{pron}} \pm 6$.

El número de operaciones N_{Op} a realizar para la determinación del umbral T en cada subimagen vendrá determinado por la suma de operaciones correspondientes para la obtención de $[Ue]_{\text{pron}}$ mediante el modelo neuronal más el número de operaciones que integra la búsqueda del umbral T dentro del rango dinámico.

La figura 8.19 muestra un ejemplo de búsqueda del umbral T dentro del rango dinámico del histograma suavizado. El $[Ue]_{\text{pron}}$ viene dibujado como una línea discontinua de color rojo, el nivel mínimo n_{\min} y máximo n_{\max} del rango dinámico vienen dibujadas como líneas discontinuas en verde y magenta respectivamente y, finalmente, el nivel del gris encontrado T para la binarización de la subimagen como una línea continua de color rojo.

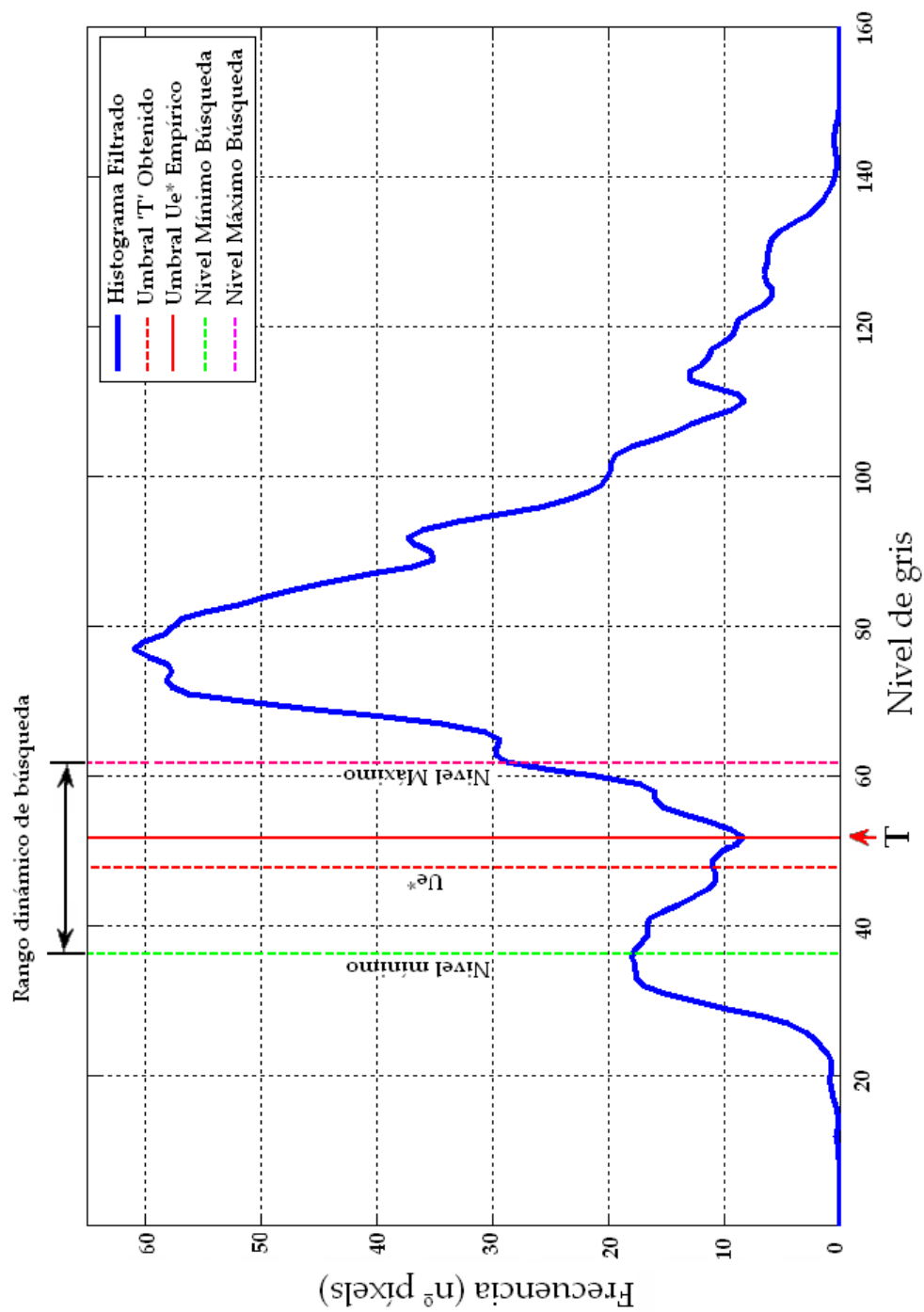


Figura 8.19: Rango dinámico de búsqueda del umbral T.

8.3.4 Binarización de la imagen completa.

Una vez determinados los niveles de umbral T correspondientes en todas las subimágenes (20×20) en las que fue dividida la imagen completa se procede a realizar el proceso de binarizado donde la imagen de niveles de gris original será transformada en una imagen binaria mediante la ecuación 4.17 (sección 4.2.1 del capítulo 4). De esta manera, los píxeles que han sido considerados como defecto (manchas de óxido residual) tendrán asignado el valor '0' mientras que el resto tendrán asignado el valor '1' (superficie de acero inoxidable libre de defecto).

El proceso de binarizado se podría efectuar aplicando distintas estrategias según los niveles de umbral obtenidos en cada subimagen. Se podría considerar que el valor del nivel de umbral de cada subimagen es completamente *independiente* de los obtenidos en subimágenes vecinas, o bien, que exista *cierto grado de relación*.

En el primero de los casos, el proceso de binarización es directo y no necesita nada más recorrer la imagen completa aplicando el nivel de umbral obtenido en cada subimagen según las coordenadas (x, y) de cada píxel. En este caso se tendrían niveles de umbrales por zonas. En el segundo caso, se construiría primeramente una superficie de niveles de umbral mediante la interpolación de los umbrales obtenidos en cada subimagen para, de forma análoga al caso anterior, recorrer la imagen completa y aplicar el umbral correspondiente con cada coordenada. De esta manera se tendría niveles de umbral por píxel. Tanto una estrategia como la otra tienen sus ventajas e inconvenientes.

Si se considera que cuando se producen defectos en una imagen éstos se reparten por grandes zonas o incluso por la imagen completa, probablemente la estrategia de binarizado mediante la construcción de superficie de umbral será más efectiva y robusta, ya que sí se da esa relación entre los umbrales de subimágenes adyacentes. Por otro lado, al no haber grandes diferencias entre los umbrales de píxeles pertenecientes a subimágenes adyacentes se reducirían los efectos de escalonado (manchas de defecto que tienen parte de su superficie repartida entre dos o tres subimágenes vecinas con niveles de umbral con cierto grado de diferencia aparecerían parcialmente incompletas). El inconveniente de esta estrategia es el incremento del coste computacional debido a la construcción de la superficie de umbralización.

En cambio, se puede considerar una aparición de manchas de defecto localizadas donde el grado de relación entre subimágenes contiguas podría ser relativamente bajo lo que sugeriría la conveniencia de aplicar la estrategia considerada en primer lugar. Se trata de una circunstancia muy real, ya que uno de los problemas de aparición de manchas de óxido residual de este tipo está ocasionado por la rotura o desgaste localizado de los cepillos de decapado. En otros casos pueden presentarse como manchas de óxido sobre arañazos y/o marcas de cilindros y rodillos. Por otro lado, la irregularidad superficial del acero origina zonas, dentro de una misma imagen, con topografías diferentes entre sí provocando la existencia de manchas localizadas. Si en estos casos se considerara la binarización mediante superficie de umbral, las manchas de tipo local podrían quedar minimizadas pudiendo llegar, en los casos más extremos, hasta el punto de no ser detectadas debido a la influencia de los bajos niveles de umbral obtenidos en subimágenes contiguas.

Una vez analizada la problemática, *se opta por la estrategia de binarización directa donde se recorre la imagen aplicando el nivel de umbral obtenido en cada subimagen. El número de operaciones N_{Op} de la operación de binarizado se corresponderá con el número de píxeles de la imagen $(M \times N)$.*

8.4 POSTPROCESAMIENTO DE IMAGEN.

Una vez realizada la binarización de la imagen completa, ésta puede contener cierto ruido derivado del proceso de segmentación que no se corresponde con manchas de defecto (figura 8.20). Este es el caso de ciertos píxeles aislados considerados como defecto que no tienen suficiente superficie ni forma para ser considerados manchas de óxido residual de tamaño mínimo. En la sección 7.3.2 del capítulo 7, se consideró que las dimensiones de la mancha de óxido más pequeña detectable por el sistema tenían que tener al menos cuatro píxeles por mancha en una disposición espacial de 2×2 píxeles. Ésta será, por tanto, la característica básica sobre la que se apoyará el proceso de eliminación de ruido.



Figura 8.20: Operaciones realizada durante la etapa de postprocesamiento.

Partiendo de una imagen binarizada y con el objetivo de eliminar el ruido existente en ella como resultado del proceso de segmentación, las técnicas basadas en operaciones morfológicas binarias pueden brindar una buena solución. En concreto, la aplicación de la operación de apertura (ecuación 4.25 en la sección 4.3.1 del capítulo 4) podría eliminar el ruido extrayendo manchas de defecto de la imagen a partir de la estructura geométrica correspondiente con el tamaño mínimo de mancha definido. En definitiva, se definiría un elemento estructurante cuya forma y geometría fuese la de la mancha de óxido de menor dimensión.

Aunque la eliminación de ruido también podría abordarse mediante la operación de cierre se descarta debido a que, además, rellena huecos interiores que pueden aparecer en las manchas detectadas y esto no interesa (ciertas manchas de defecto rodean completamente crestas correspondientes con la topografía de la superficie de acero).

De acuerdo con el tamaño mínimo de mancha de defecto, la máscara correspondiente con el elemento estructurante B es la siguiente:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.18)$$

Las operaciones morfológicas pueden implementarse a partir de la operación de convolución¹¹, aplicada en operaciones de filtrado en el dominio espacial y frecuencial, donde una máscara o kernel recorre la imagen completa obteniéndose una imagen filtrada con la particularidad de que, en este caso, tanto la imagen a filtrar como la máscara son binarias.

¹¹ Ver ecuación 4.9 en sección 4.1.2 del capítulo 4.

La operación de apertura va a consistir en una secuencia de una operación de erosión (eliminación del ruido) seguida de una dilatación (reconstrucción de elementos). Las ecuaciones 8.19 y 8.20 representan las operaciones de erosión y dilatación respectivamente.

$$g(i, j)_E = \begin{cases} 1 & \text{si } [f(i, j) = 1] \wedge [B(k, l) \cap f(i - k, j - l) = 1] \quad \forall k, l \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases} \quad (8.19)$$

$$g(i, j)_E = \begin{cases} 1 & \text{si } [f(i, j) = 1] \vee [B(k, l) \cap f(i - k, j - l) = 1] \quad \exists k, l \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases} \quad (8.20)$$

El número de operaciones de que consta la apertura será la suma de las operaciones de erosión y dilatación:

$$N_{OP} = 4MN + 4MN = 8MN \quad (8.21)$$

8.5 ETIQUETADO, EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.

El procesamiento de imagen realizado en las etapas precedentes se complementa mediante la ejecución de tres operaciones previas (figura 8.21) a la generación de una serie de datos estadísticos finales. La primera operación, etiqueta las manchas de defecto encontradas en la imagen binaria, la segunda calcula las dimensiones de cada mancha y la tercera clasifica las manchas según un grupo dimensional definido. Las tres operaciones se realizan a la vez ejecutándose bajo un único algoritmo. Finalmente, se extraerán ciertos estadísticos representativos de la densidad de manchas detectadas por unidad de superficie según el grupo dimensional.

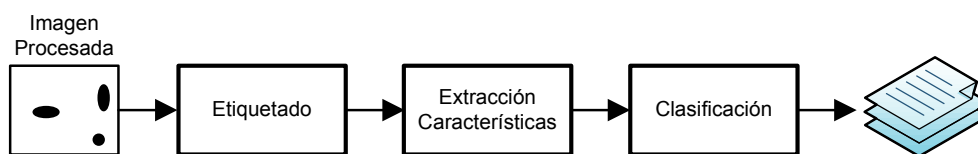


Figura 8.21: Etiquetado, extracción de características y clasificación.

8.5.1 Grupos dimensionales, etiquetado, mediciones y clasificación.

Una vez que las manchas correspondientes con el defecto han sido separadas del fondo de la imagen y filtrado el ruido resultado de la etapa de segmentación, se requiere una operación de etiquetado de manchas donde a cada mancha se le asignará un identificador que la define de forma exclusiva.

Esta operación se realiza sobre la imagen binaria, fijando primeramente un punto de origen o inicio (normalmente la esquina superior izquierda) desde el cual se recorrerá la imagen completa. Existen numerosas técnicas más o menos sofisticadas que realizan el etiquetado. Entre ellas se encuentran el bug following, el backtracking bug follower, crack code, etc.([183]).

Tratando de optimizar el procesamiento, se ha realizado el etiquetado, cálculo de las dimensiones y la clasificación de las manchas según el grupo dimensional en un único algoritmo que recorre una sola vez la imagen binaria.

Los grupos dimensionales¹² en los que se clasificarán las manchas de defecto son los siguientes:

- Grupo 1: entre 50 y 100 μm^2 (equivalente a manchas que contienen entre 4 y 16 píxeles).
- Grupo 2: entre 100 y 150 μm^2 (manchas entre 16 y 32 píxeles).
- Grupo 3: entre 150 y 200 μm^2 (manchas entre 32 y 64 píxeles).
- Grupo 4: más de entre 200 μm^2 (manchas con más de 64 píxeles).

¹² Se establecen los grupos dimensionales de común acuerdo con el fabricante de acero inoxidable.

El algoritmo comienza recorriendo la imagen desde la esquina superior izquierda (sentido izquierda a derecha y de arriba a abajo). Cuando se encuentra el primer píxel considerado como defecto se asocia una etiqueta para identificarlo como primer elemento y, a continuación, se analizan los píxeles vecinos para verificar si son o no considerados defecto. Si lo son, se asignan a la etiqueta definida. Siguiendo con el procesamiento, si se encuentra un nuevo píxel considerado defecto y no sea vecino de ningún otro ya etiquetado se le asocia una nueva etiqueta. Esta secuencia continuaría hasta el final de la imagen. Paralelamente a esta operación se van contabilizando el número de píxeles de cada etiqueta y se incrementa el número de manchas detectadas y ya medidas según su grupo dimensional.

El número de operaciones de que consta el algoritmo de etiquetado de manchas será el de un recorrido completo de la imagen:

$$N_{OP} = MN \quad (8.22)$$

8.5.2 Resultados finales.

Una vez realizados el etiquetado de las manchas de defecto, su conteo y clasificación dentro de cada grupo dimensional se genera una serie de información derivada. Los resultados finales están compuestos por imágenes reales de la superficie inspeccionada, imágenes procesadas y estadísticas obtenidas a partir del valor de unos índices extraídos de las imágenes. Estos datos se utilizarán *a posteriori* en la interfaz de usuario y en el análisis de datos históricos y estadísticos del sistema de inspección visual automatizado.

Los índices extraídos de la imagen completa se corresponden con la densidad de manchas existentes en la imagen, es decir, el número de manchas totales en cada grupo por unidad de superficie.

Considerando las dimensiones $M \times N$ de la imagen en píxeles (donde $M = 822$ píxeles y $N = 1056$ píxeles) y la resolución espacial del sistema R_s definida en la sección 7.3.2 del capítulo 7:

$$R_s = 0,025 \text{ mm/píxel} \quad (8.23)$$

La imagen adquirida por el sistema tiene unas dimensiones en unidades de longitud de:

$$\begin{cases} M_L = R_s \cdot M = 20,55 \text{ mm} \\ N_L = R_s \cdot N = 26,40 \text{ mm} \end{cases} \quad (8.24)$$

Y la superficie S expresada en centímetros:

$$S = \frac{M_L \cdot N_L}{100} = 5,4252 \text{ cm}^2 \quad (8.25)$$

La densidad de manchas ρ_i según el grupo dimensional i se puede expresar de la siguiente forma:

$$\rho_i = \frac{N_i}{S} = \frac{N_i}{5,4232} \quad (8.26)$$

donde N_i es el número de manchas detectada en el grupo dimensional i .

Parte III

RESULTADOS, VALIDACIÓN Y CONCLUSIONES

RESULTADOS

En los capítulos 7 y 8 se ha establecido una arquitectura de adquisición y un algoritmo de procesamiento de imágenes que trata de resolver el problema de detección de óxido residual en el ámbito de una línea de recocido y decapado de fabricación de acero inoxidable.

Así, en el capítulo 7, se trataron aquellos aspectos relacionados con el diseño del sistema de inspección desde el punto de vista de la adquisición de imágenes. Se describieron el objeto a inspeccionar (bobina de acero inoxidable) y el defecto a detectar (óxido residual), las características del entorno donde ha de ubicarse el sistema de inspección y se realizó un estudio pormenorizado de las velocidades de desplazamiento de la banda y del sistema de inspección. Este último aspecto es de gran importancia, puesto que la inspección superficial no se lleva a cabo sobre la superficie completa de la bobina sino que está basado en un muestreo aleatorio con una determinada fiabilidad y exactitud.

A partir de las especificaciones de diseño se determinaron parámetros y variables para la elección y dimensionado del sistema de visión (tipo de cámara necesaria, resolución espacial del sistema, magnificación, distancia focal, campo de visión, profundidad de campo, tasa de datos instantánea, píxel rate, etc.).

Finalmente, se realizó un análisis y diseño del sistema de iluminación necesario. Dada la dificultad *per se* de la solución propuesta, se realizaron una serie de simulaciones del sistema con resultados satisfactorios.

El capítulo 8 se centró exclusivamente en las etapas de procesamiento de imagen necesarias para la detección de las manchas de óxido de manera fiable y robusta. La estrategia general estaba basada considerando una serie de criterios y condiciones de contorno: homogeneidad del material, consideración de las manchas de óxido como defecto local, contraste del defecto respecto al acero, restricciones temporales y entorno industrial.

Así, en una primera etapa de preprocesamiento, se realizaba el tratamiento del ruido y el realce del defecto mediante un algoritmo de suavizado con preservado de bordes al que seguía una división de la imagen en subimágenes como estrategia para solucionar el problema de una iluminación no homogénea. Para cada subimagen se calculaba y suavizaba su histograma extrayendo su tendencia.

En una segunda etapa, se realizaba la segmentación basada en técnicas de umbralización con la particularidad de buscar el umbral dentro de un rango dinámico de búsqueda, dentro del cual, la probabilidad de encontrar el umbral adecuado era mayor. La obtención del rango dinámico se realizaba mediante la creación de un modelo matemático empírico construido a partir de la adquisición del conocimiento de un experto. Se aportaron dos soluciones para la construcción del modelo basadas en una regresión lineal múltiple y en una red neuronal. Ambos modelos pronosticaban el umbral teórico origen de búsqueda sobre el que se definía el rango dinámico siendo el modelo neuronal el que presentaba un mejor comportamiento.

La tercera etapa, denominada postprocesamiento, eliminaba los falsos positivos derivados del proceso de segmentación mediante la aplicación de técnicas morfológicas.

Finalmente, se realizaba un etiquetado y conteo de las manchas de defecto detectadas, una clasificación de las manchas en grupos dimensionales y una extracción de índices estadísticos en forma de densidad de defecto por unidad de superficie.

El resultado de esta metodología se plasma en la implementación del sistema de inspección [397] y su instalación, integración y puesta en operación en una línea de decapado y recocido de una fábrica de producción de acero inoxidable¹.

Una vez puesto en operación, el sistema va a recabar datos que permitirán *a posteriori* la validación de la metodología propuesta en la presente memoria.

El capítulo actual desarrolla todos aquellos aspectos relacionados con la implementación del sistema de inspección y su integración en la factoría.

¹ En la actualidad se tienen tres sistemas de inspección instalados en funcionamiento. Dos de ellos se encuentran en la factoría que tiene Acerinox Europa, S.A.U. en Los Barrios (Cádiz), en las líneas de producción AP2 (desde septiembre de 2007) y P4 (desde septiembre de 2013), y el tercero, en la factoría que tiene Columbus Stainless, (Pty) Ltd. en Middelburg (Sudáfrica), en la línea de producción AP1 (desde octubre de 2008).

9.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN VISUAL AUTOMATIZADO.

En líneas generales, el sistema de inspección visual automatizado está basado en un servomecanismo que controla una serie de movimientos de una caja difusora cuyo interior contiene el sistema de iluminación además de una cámara industrial que adquiere imágenes de la superficie del acero inoxidable.

Las imágenes son posteriormente procesadas por un PC industrial para la obtención de los índices que caracterizan la calidad superficial respecto a su contenido de manchas de óxido residual.

Los resultados finales son transferidos a un sistema de almacenamiento de datos de la factoría quedando disponibles tanto para una monitorización y supervisión on-line, como para un análisis de datos históricos y estadísticos.

La figura 9.1 muestra la arquitectura a nivel funcional del sistema de inspección y la relación que mantiene con los elementos principales de su entorno. La figura 9.2 muestra la arquitectura desde el punto de vista de su integración en los distintos niveles de la factoría. Las funciones principales que va a realizar cada elemento son las siguientes:

- *Control del Sistema de Inspección.* Adquisición de señales de sensores, control de posicionamiento y operaciones básicas del servomecanismo (puesta en marcha, parada, mantenimiento, ajuste, etc.) realizadas mediante un PLC de control.
- *Comunicación con Línea de Producción (Nivel 1).* Eventos y datos (metraje, estados y operaciones, alarmas, etc.) son transmitidos entre el sistema de inspección y la línea de proceso de forma directa y/o mediante bus de comunicación industrial.
- *Adquisición y Procesamiento de Imágenes (Nivel 1 y 2).* En el PC industrial se realizará la generación de las señales de control de la cámara y proyectores estroboscópicos y la adquisición y procesamiento de las imágenes.
- *Comunicación entre PC Industrial, PLC de control y Línea de Producción (Nivel 2 y 3).* Control del sistema de inspección a nivel superior, información de eventos de alarmas y estados, datos de proceso (características e identificación del material en proceso) de manera directa (RS-422/485) y/o indirecta (Ethernet/Bus industrial).
- *Almacenamiento de Datos (Nivel 3).* Almacenamiento en base de datos y servidores de ficheros de información de imágenes y datos derivados de calidad procesados por el sistema de inspección.
- *Monitorización y Supervisión (Nivel 3 y 4).* Interfaz de usuario para la monitorización y supervisión del proceso de inspección on-line.
- *Análisis de Datos (Nivel 4).* Consulta de datos históricos y presentación de informes para el análisis y evaluación de la calidad del proceso.
- *Acceso Remoto a Datos.* Posibilidad de acceso a datos de información del sistema de forma remota a través de internet.

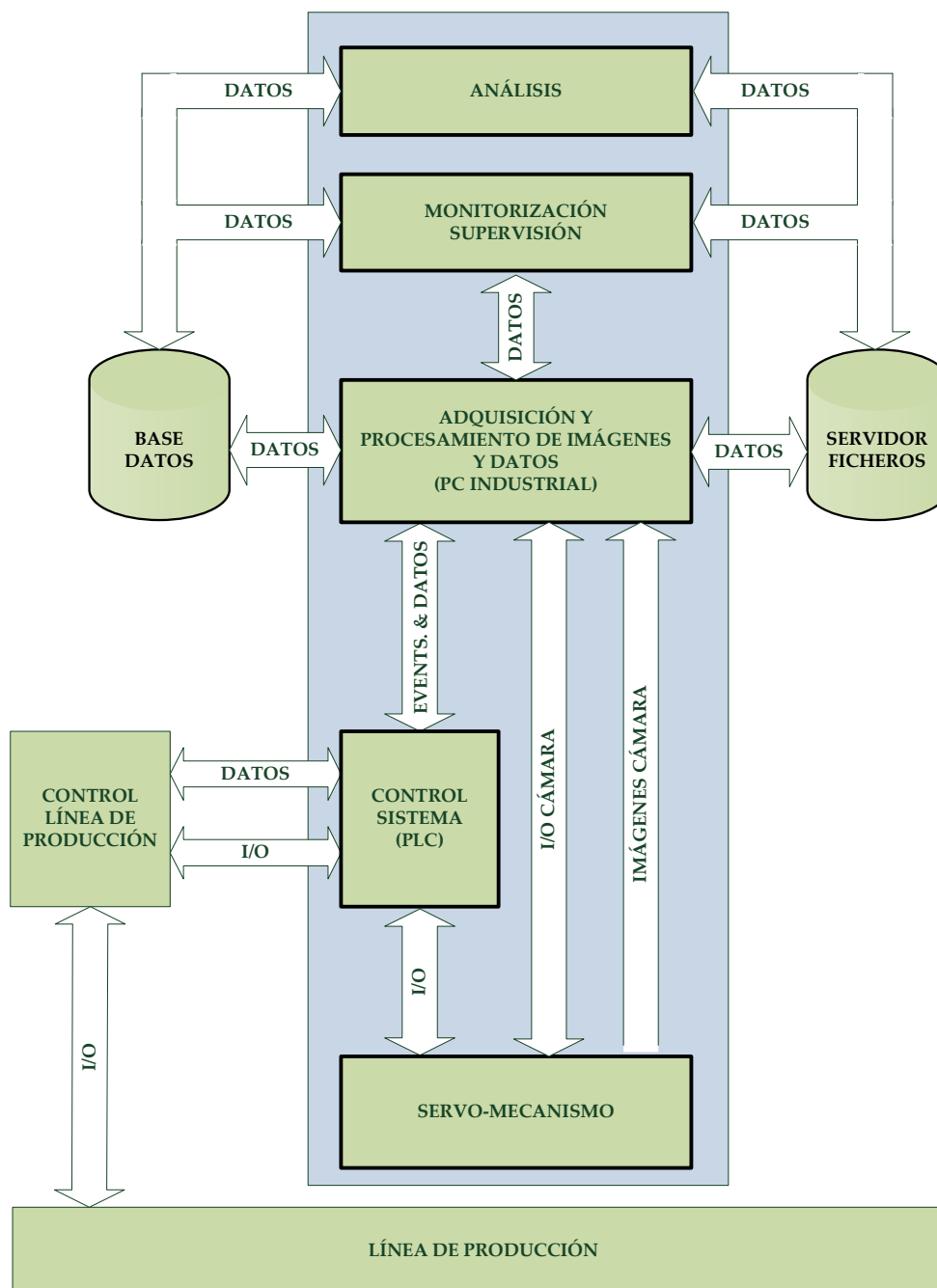


Figura 9.1: Arquitectura general del sistema de inspección.

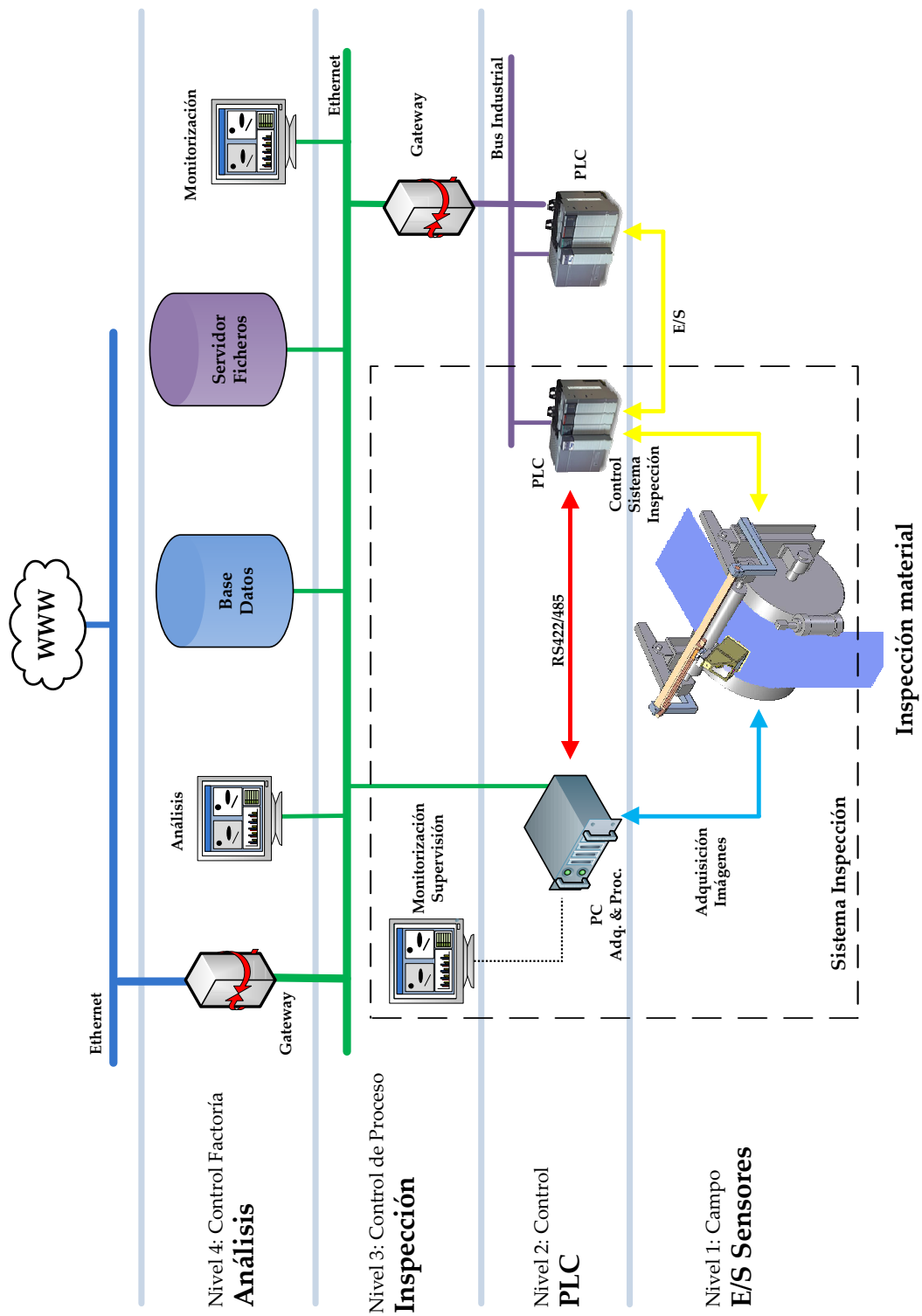


Figura 9.2: Arquitectura en niveles del sistema de inspección.

9.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.

El presente apartado describe de forma general todos aquellos aspectos relacionados con el sistema de adquisición: ubicación en la línea de producción, soluciones de diseño mecánico existentes, caja difusora y elementos que la conforman, movimientos de desplazamiento requeridos por el sistema y su control y comunicación con el operador humano.

Observación: a continuación se va a realizar una descripción de los elementos mecánicos del sistema de adquisición. Una descripción más detallada puede encontrarse en la sección [G.1](#) del apéndice [G](#).

9.2.1 Ubicación del sistema.

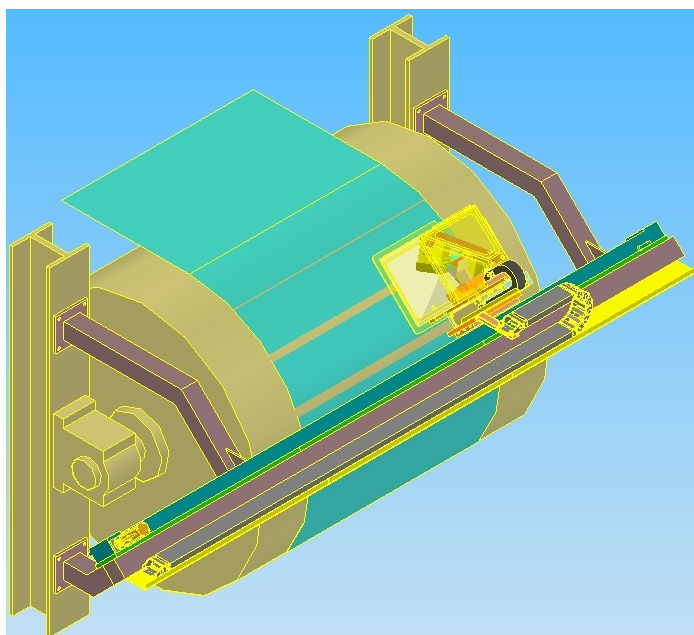
El sistema de adquisición queda instalado en la salida de la sección de descascarillado y decapado tras la operación de secado y antes del bucle (ver figura [6.2](#) en el capítulo [6](#)) ya que ésta es la ubicación donde finaliza completamente el decapado y desde donde con más antelación se puede informar al personal de calidad para que tome medidas correctivas del proceso de producción si así fuera necesario.

9.2.2 Soluciones de diseño mecánico.

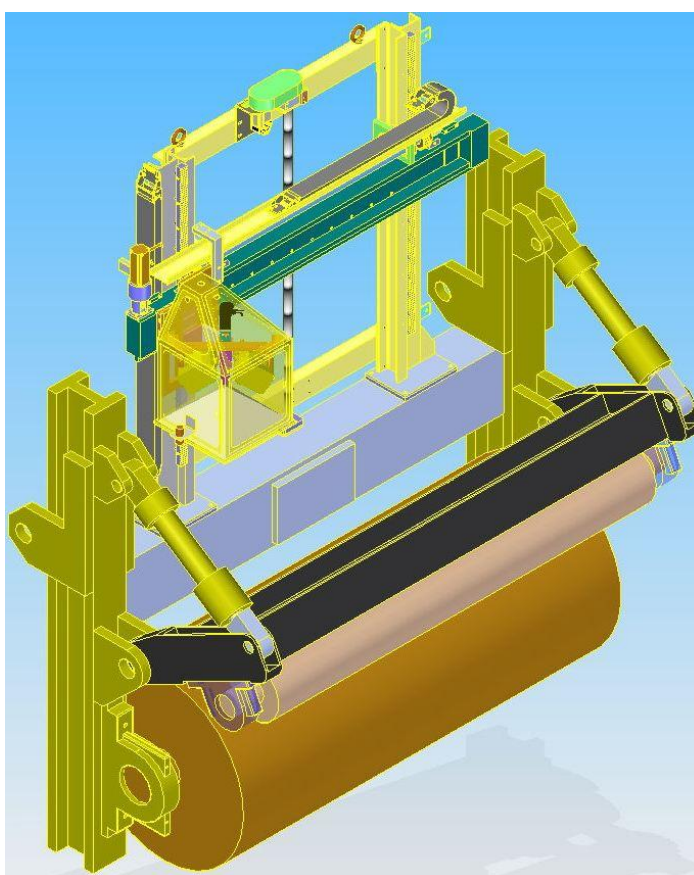
La estructura mecánica del sistema de adquisición ha de adaptarse e instalarse en la ubicación elegida dentro de las diferentes líneas de producción. Debido a esta adaptación, se han obtenido dos soluciones mecánicas diferentes para el sistema de adquisición. Una solución denominada *estándar* (figura [9.3a](#)) implantada en las líneas AP2 de la factoría de Acerinox Europa S.A.U. de Los Barrios y en la línea AP1 de la factoría de Columbus Stainless (Pty) Ltd. de Middelburg y otra solución denominada *compacta* (figura [9.3b](#)) instalada en la línea P4 de la factoría de Los Barrios.

La solución *estándar* dispone de una ubicación lateral para operaciones de mantenimiento (parte izquierda de la figura [9.3a](#)) y realiza la entrada en operación lateralmente (transversal al desplazamiento longitudinal de la bobina).

En la solución *compacta* la posición de mantenimiento se encuentra en su parte superior y realiza la entrada y salida de operación mediante un desplazamiento en dirección perpendicular a la superficie de la bobina. Se trata de una solución que se implementa cuando no se dispone de espacio suficiente.



(a) Solución estándar.



(b) Solución compacta.

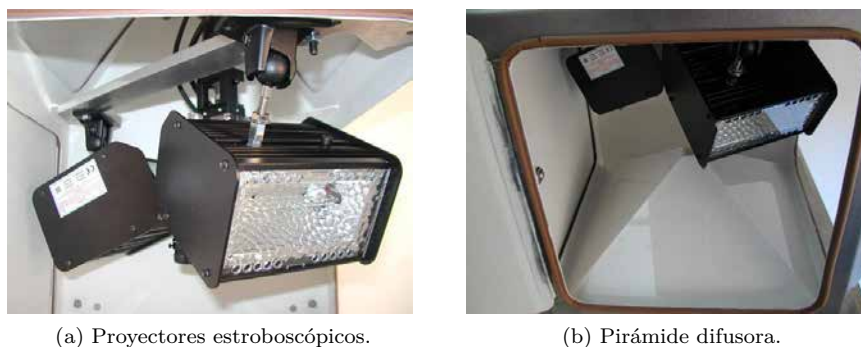
Figura 9.3: Soluciones mecánicas del sistema de adquisición.



(a) Vista exterior.

(b) Vista interior.

Figura 9.4: Caja difusora.



(a) Proyectores estroboscópicos.

(b) Pirámide difusora.

Figura 9.5: Sistema de iluminación.

9.2.3 Caja difusora.

La caja difusora (figura 9.4) es la parte más importante del sistema de adquisición de imágenes. Se trata de una estructura rígida construida de acero inoxidable que contiene el sistema de iluminación, la cámara industrial y un servomecanismo que, como se verá más adelante, se utiliza para realizar el enfoque de la imagen adquirida por la cámara.

Exteriormente, la caja lleva fijado un sensor de desplazamiento ultrasónico² que proporciona la distancia a la superficie de la banda de acero. Interiormente está recubierta de una capa de pintura blanca mate para maximizar las reflexiones interiores de la iluminación generada por los proyectores estroboscópicos (figura 9.5a). También contiene una pirámide difusora (figura 9.5b) construida en policarbonato blanco opal para difuminar aún más los rayos que inciden sobre su superficie y conseguir el efecto de la técnica de iluminación libre de sombras.

² Detalle del sensor y su ubicación mostrados en figura G.1 del apéndice G.

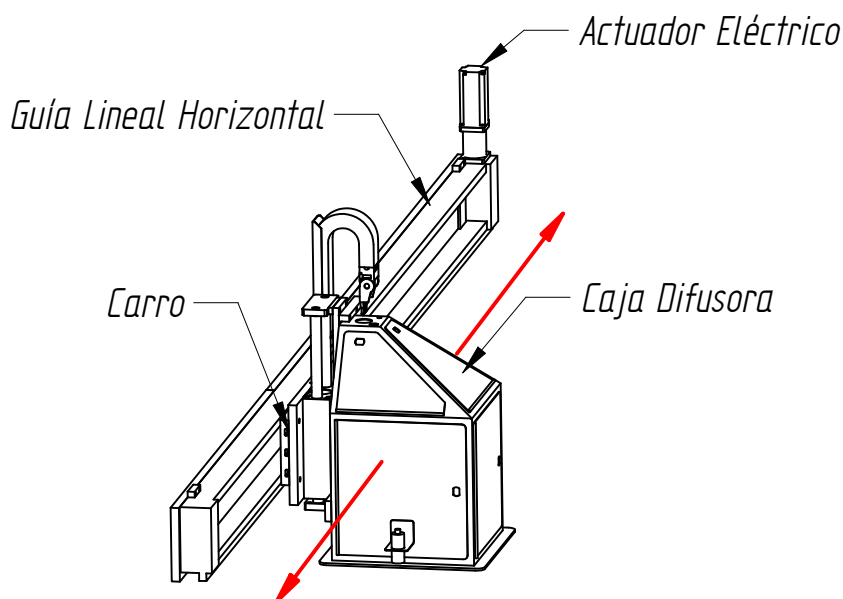


Figura 9.6: Movimiento de barrido (flecha roja).

9.2.4 Movimiento de barrido.

Tanto en la solución estándar como en la compacta se realiza un movimiento de barrido de la superficie de la bobina (figura 9.6). Este movimiento se realiza perpendicular a la dirección de desplazamiento de la bobina a lo largo de la línea. El movimiento se produce accionando, mediante un actuador eléctrico, el carro o patín de una guía lineal horizontal. Solidario al movimiento de este carro se encuentra la caja difusora.

La dimensión del movimiento de barrido se puede establecer de dos formas distintas:

- De forma estática, fijando esta variable. Se considera el mayor ancho nominal de bobina que se procesa en la línea al que se le añade un pequeño margen del posible desplazamiento transversal que puede sufrir la banda durante su procesamiento.
- De forma dinámica, cuando el valor de esta variable es conocido. Es decir, se conoce el ancho de la bobina y cuánto se encuentra desplazada transversalmente.

En este último caso, la posición de ambos bordes de la banda debe ser conocida por el sistema de inspección para que éste pueda adaptar el movimiento de barrido de forma automática.

Con el barrido dinámico se consigue que cada imagen adquirida por el sistema siempre sea de la superficie de acero, a diferencia del barrido estático, que adquiere imágenes de la superficie de acero, de la superficie del rodillo tensor o mixtas. En el barrido estático, por tanto, hay que realizar un procesamiento previo de descarte de aquellas imágenes que contienen parte de la superficie del tensor.

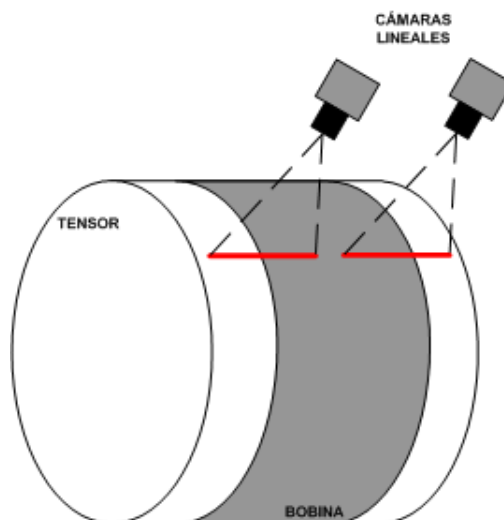


Figura 9.7: Sistema de medición de ancho.

El barrido dinámico se ha logrado implementar en la práctica solamente en la línea AP2 mediante la información suministrada por un sistema de medición de ancho de bobinas de acero instalada en la misma ubicación que el sistema de inspección [143, 27, 136, 137].

El sistema de medición de ancho de bobinas opera en tiempo real procesando imágenes adquiridas por dos cámaras lineales CCD ubicadas sobre los bordes de la banda dando como resultado la posición en la que se encuentra cada borde y el ancho de la banda (figura 9.7).

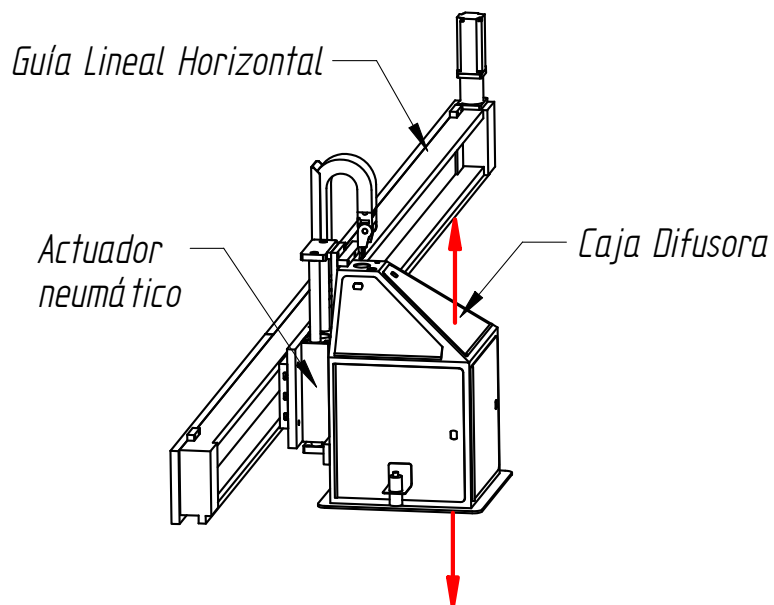
9.2.5 *Movimiento de aproximación a la superficie.*

Además del movimiento de desplazamiento de barrido, el sistema de adquisición está dotado de un movimiento de desplazamiento de aproximación perpendicular a la superficie.

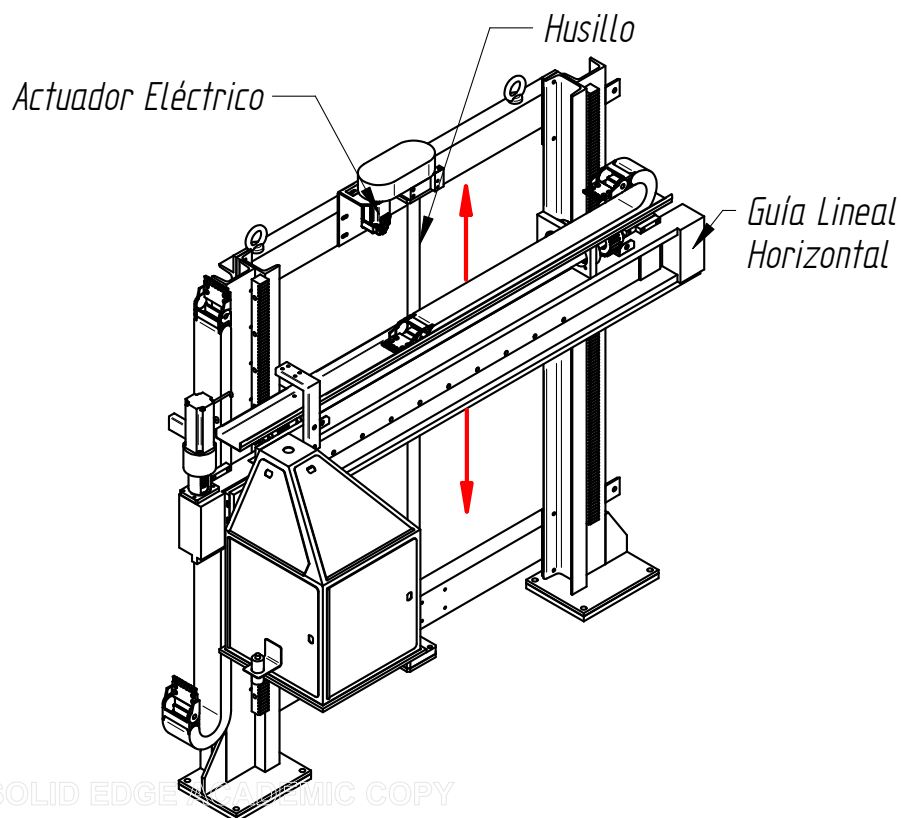
Este movimiento tiene dos objetivos principales. Por un lado, aproxima la caja difusora hasta la distancia adecuada de inspección, y por otro, permite retirar la caja difusora de forma rápida hasta una distancia de seguridad en el caso de que la banda se aproxime peligrosamente a la caja y pueda golpearla poniendo en riesgo su integridad.

En el diseño estándar (figura 9.8a), el movimiento de aproximación a la superficie se ha implementado fijando la caja difusora a la parte móvil de un actuador neumático instalado sobre el carro de la guía lineal horizontal.

El diseño compacto ha requerido la implementación de una solución más compleja para conseguir este movimiento. En este caso, la caja difusora se fija directamente al carro de la guía lineal horizontal y todo el conjunto, guía lineal horizontal y caja difusora, es desplazado verticalmente mediante un actuador eléctrico (figura 9.8b).



(a) Actuador neumático (diseño estándar).



(b) Actuador eléctrico (diseño compacto).

Figura 9.8: Movimiento de aproximación perpendicular (flecha roja).

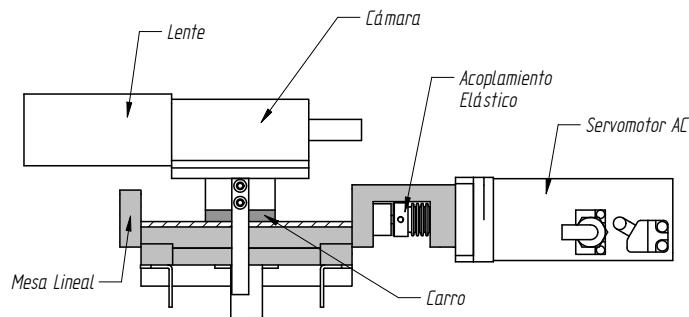


Figura 9.9: Elementos para el movimiento de enfoque de la cámara.

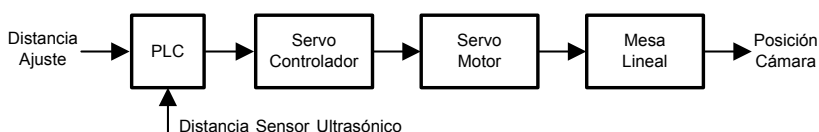


Figura 9.10: Control del movimiento de enfoque.

9.2.6 Movimiento de enfoque de la cámara.

En la sección 7.3.3 del capítulo 7 se hacía la observación de la imposibilidad de inspeccionar todo el rango de espesores nominales de bobinas que podían ser procesados en la línea con el valor que se obtuvo para la profundidad de campo y que, por tanto, era necesario dotar al sistema de un movimiento de acercamiento/alejamiento para mantener constante la distancia de trabajo y así el enfoque de la imagen.

A esta variación de los espesores de las bobinas hay que añadirle pequeños desplazamientos que puede sufrir la banda de acero en la dirección del eje óptico de la cámara ocasionados por variaciones en la tensión de tracción de la bobina.

En consecuencia, se requiere un sistema robusto que aporte el movimiento necesario para compensar estos desplazamientos y mantenga constante la distancia de trabajo. Este sistema debe tener una velocidad de respuesta rápida para compensar los desplazamientos de la banda y evitar el desenfoco de las imágenes.

La solución adoptada ha sido la implementación de un servomecanismo compuesto por un actuador eléctrico (servomotor AC) acoplado al eje de una mesa lineal cuya rotación desplaza un carro sobre el que va fijado el conjunto cámara-lente (figura 9.9)³.

Para mantener constante la distancia de trabajo se realiza un control de posición en bucle cerrado retroalimentado por la señal del sensor de desplazamiento ultrasónico y cuya consigna es un valor procedente del ajuste del sistema (figura 9.10).

³ La figura G.2 del apéndice G muestra la solución real.

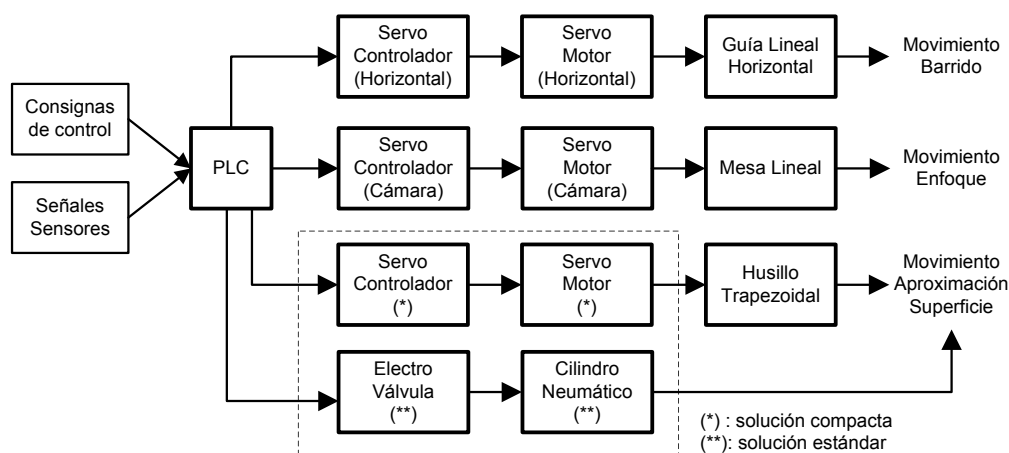


Figura 9.11: Elementos del sistema de control del servomecanismo.

9.2.7 Control del servomecanismo.

El servomecanismo genera los movimientos que requiere el sistema de adquisición a partir de una serie de consignas de control y señales de sensores de entrada. movimiento de barrido, de aproximación a la superficie y de enfoque de la cámara industrial.

El elemento principal para el control del servomecanismo es el autómata programable o PLC⁴. En este dispositivo se encuentran las consignas de control de posición y velocidad de los tres movimientos (figura 9.11).

9.2.8 Interfaz de control del servomecanismo.

Los movimientos del servomecanismo quedan integrados dentro de una operativa de control de orden superior (figura 9.12). Esta operativa tiene las siguientes funciones principales:

- *Puesta en operación* (O1). Secuencia de movimientos para poner el sistema de adquisición desde el estado de parada al estado de medición.
- *Salida de operación* (O2). Secuencia de movimientos para llevar el sistema desde el estado de medición al estado de parada.
- *Chequeo* (O3). Secuencia de movimientos para la verificación de sensores y reseteo de errores.

Cada función lleva al sistema de un estado a otro siendo éstos los siguientes:

- *Inicialización* (E0). Estado de arranque del sistema donde se inicializan parámetros y variables del PLC.
- *Parada* (E1). El sistema se encuentra fuera de la línea y ha detenido todos sus movimientos.

4 La figura G.3 del apéndice G muestra el armario de control donde se ubica el PLC.

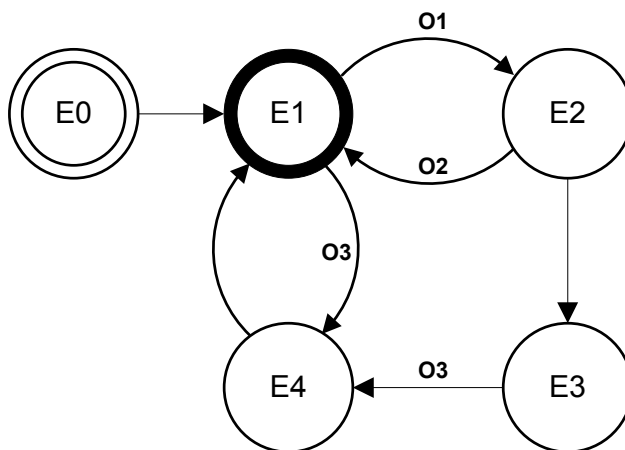
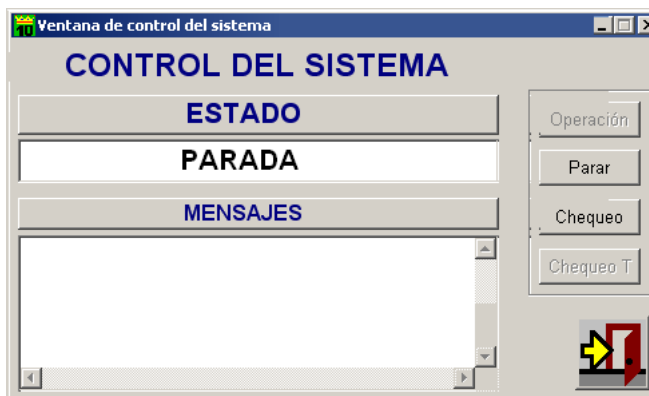


Figura 9.12: Funciones principales y estados del sistema de adquisición.



(a) Cuadro de mando.



(b) Interfaz software.

Figura 9.13: Interfaces de control del sistema.

- *Medición* (E2). El sistema se encuentra realizando el movimiento de barrido a la distancia de trabajo y adquiriendo imágenes.
- *Error* (E3). El sistema ha detectado un error y ha detenido todos sus movimientos.
- *Chequeo* (E4). El sistema se encuentra realizando la secuencia de movimientos de la función de chequeo.

La orden de ejecución de una determinada función se realiza a través de una interfaz de control de nivel superior. Ésta puede ser efectuada desde un cuadro de mando (figura 9.13a) o desde una aplicación software que se ejecuta en el PC del operador de control de calidad (figura 9.13b).

9.3 INFORMACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.

9.3.1 Determinación del metraje de la bobina.

La *medición del metraje* y su *puesta a cero* son fundamentales para la asignación de los resultados de la inspección a cada tramo de longitud de bobina.

La *medición del metraje* se realiza mediante la instalación de un *encóder rotativo incremental* sobre el eje del rodillo tensor (figura 9.14). El tren de pulsos generado por el encóder es adquirido por el PLC de control donde se procesará para obtener la medida.

La *puesta a cero* del metraje se lleva a cabo mediante un *sistema de seguimiento de soldadura* compuesto por una cámara industrial, una luminaria y un pequeño PC industrial. La cámara (figura 9.15a) se encuentra ubicada unos metros antes del sistema de adquisición. El PC ejecuta una aplicación que procesa las imágenes adquiridas por la cámara para detectar la línea que identifica la soldadura (figura 9.15b). El algoritmo de procesamiento de imagen se detalla en [161].

Una vez detectado el paso de la soldadura, el PC genera una señal digital que es adquirida por el PLC de control para poner a cero el metraje.



Figura 9.14: Encóder rotativo incremental sobre eje del rodillo.



(a) Cámara.



(b) Detalle del cordón de soldadura.

Figura 9.15: Sistema de seguimiento de soldadura.

9.3.2 *Eventos en la línea de producción.*

La línea de producción genera una serie de eventos que son interesantes adquirir por el sistema de adquisición. Estos eventos permiten tener un mejor conocimiento de posibles circunstancias que pueden afectar la normal operación del sistema. Así, una detención de la línea, pérdida de presión en la conducción principal de aire comprimido, corte de tensión, etc., permiten que el sistema realice acciones de autoprotección ubicándose en una posición de seguridad evitando, de esta manera, posibles riesgos.

La información suministrada como señales digitales es adquirida por un módulo de entradas del PLC de control aunque también puede ser transferida a través de un bus industrial por otro autómatas programable que esté en el mismo bus.

9.3.3 *Datos y eventos de producción.*

Además de la posición longitudinal en la que el sistema está inspeccionando una bobina, éste necesita identificar la bobina que está siendo procesada y cuándo finaliza su procesamiento. Mediante esta información, los resultados derivados del procesamiento de imagen quedan asignados a una determinada bobina.

El operador de control de calidad reporta esta información por medio de una interfaz específica dedicada para el control de calidad de la línea que es transferida al sistema de inspección a través de la base de datos.

9.4 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y DATOS.

9.4.1 *Proceso de adquisición y procesamiento de imagen.*

El proceso de adquisición de imágenes está gobernado a nivel superior por la aplicación software de adquisición y procesamiento (figura 9.16) que se ejecuta en el PC de adquisición y procesamiento⁵. Esta aplicación indica a la tarjeta capturadora cuándo tiene que comenzar a adquirir una nueva imagen.

Una vez que recibe este evento, la tarjeta genera la señal de disparo (frame reset) y las señales de sincronismo vertical VD y horizontal HD de la cámara y la señal de disparo o strobe de los proyectores estroboscópicos del sistema de iluminación.

La señal de disparo de los proyectores estroboscópicos lleva cierto retardo respecto a la de disparo de la cámara por lo que la cámara iniciará el tiempo de exposición un poco antes.

El destello de los proyectores se producirá dentro del tiempo de exposición. El tiempo de exposición de la cámara es fijo y su valor se ha establecido en 125 μ s para atenuar al máximo cualquier interferencia lumínica ambiental externa que pudiera producirse en el entorno de inspección.

Finalmente, la cámara genera la señal de video compuesto que integra la señal analógica más las señales de sincronismo necesarias para la reconstrucción de la imagen en la tarjeta capturadora.

Una vez capturada y digitalizada la imagen, se procesa aplicando el algoritmo de procesamiento definido en el capítulo 8 para detectar las manchas de óxido residual que puedan existir en la imagen.

La velocidad de adquisición y procesamiento de imágenes del sistema de visión que se alcanza en la práctica es de 3,3 muestras/s valor muy superior a la tasa de adquisición de imágenes de fijadas en las especificaciones del sistema (1,01 muestras/s) revirtiendo en una mayor superficie inspeccionada. Remarcar que, durante el periodo de adquisición y procesamiento de una imagen, el sistema también dedica parte del tiempo a realizar otras actividades de menor prioridad como son accesos a base de datos, escritura de ficheros y adquisición de metraje.

9.4.2 *Datos generados por el procesamiento.*

Los resultados generados por el algoritmo de procesamiento de imagen vienen dados en forma de imágenes y datos estadísticos. Los resultados van a usarse de formas distintas:

- *Monitorización y supervisión del proceso.* Son usados para mostrar información de la bobina que se está procesando al operador de control de calidad para asistirle en la toma de decisiones (por ejemplo, solicitar que se ejecuten medidas correctivas ante un problema de exceso de óxido residual detectado).
- *Análisis de datos históricos.* Cuando finaliza el procesamiento de una bobina, los resultados son almacenados en base de datos y servidores de ficheros con objeto de una posterior consulta y análisis.

⁵ En la sección G.2 del apéndice G se muestran las características de este PC.

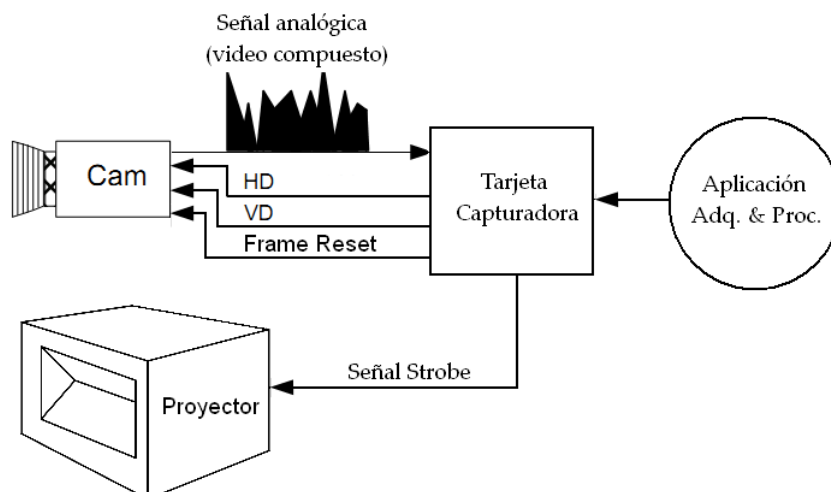


Figura 9.16: Proceso de adquisición de imágenes.

Las imágenes se generan en dos formatos distintos:

- *Fichero de imagen en formato jpg*. Imagen real sin procesar de la superficie inspeccionada.
- *Fichero de texto en formato txt*. Formato para la imagen procesada. Su contenido serán las coordenadas (x, y) de cada píxel que ha sido considerado óxido residual en la imagen.

Los datos estadísticos se generan como un fichero de texto en formato *txt* en el que cada fila se corresponde con el decímetro donde se ha calculado una estadística.

Cada estadística se calcula a partir de los valores de la densidad de manchas ρ_i de cada grupo dimensional⁶ i (ecuación 8.26 en sección 8.5.2 del capítulo 8) obtenidos a lo largo de un tramo longitudinal de bobina. Aunque la longitud de cada tramo en el que se divide la bobina puede establecerse libremente, ésta finalmente se ha fijado en 10 m. El contenido de cada fila se estructura en una serie de campos:

d	$\bar{\rho}_1$	$\bar{\rho}_2$	$\bar{\rho}_3$	$\bar{\rho}_4$
---	----------------	----------------	----------------	----------------

Donde d es el decímetro en el que se genera la estadística y $\bar{\rho}_i$ es el promedio de los valores de densidad de manchas del grupo dimensional i en el tramo considerado para generar la estadística.

⁶ Las características de los grupos dimensionales se definieron en la sección 8.5.1 del capítulo 8.

9.4.3 Almacenamiento de resultados.

Cuando el sistema de inspección detecta el evento que determina la finalización de una bobina, éste realiza un procedimiento de cierre y almacenamiento de resultados. Consta de los siguientes pasos:

1. Acceso a la base de datos para el almacenamiento del contenido del fichero de estadísticas.
2. Selección de un fichero de imagen y su correspondiente fichero de texto por cada 20 m de bobina procesada. Los ficheros seleccionados en cada tramo se corresponderán con aquellos donde se hayan detectado un mayor número de manchas de óxido residual. En el caso de no detectarse manchas de óxido residual en un tramo, se escogerán los ficheros pertenecientes al centro del tramo. Estos ficheros serán mostrados posteriormente en la *aplicación de análisis y consulta de datos históricos*.
3. Compresión de los ficheros de imagen y texto en un único fichero comprimido.
4. Almacenamiento del fichero comprimido en un servidor repositorio de ficheros.

9.5 SOFTWARE DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN.

Las aplicaciones software que componen el sistema de inspección (figura 9.17) permiten dotar a éste de todas aquellas funciones necesarias para cumplir con los objetivos de detección de óxido residual y la integración del sistema en la línea de producción y los distintos niveles de la arquitectura de información de la factoría.

Desde el punto de vista de la localización de las aplicaciones, algunas de ellas se ejecutan dentro del PC de adquisición y procesamiento y otras fuera de éste en ubicaciones de nivel superior donde se requiere llevar una monitorización del sistema y un análisis de los datos generados por éste.

Las aplicaciones software del sistema de inspección son las siguientes (una descripción detallada e imágenes de las aplicaciones se muestran en la sección G.3 del apéndice G.):

- *Aplicación de adquisición y procesamiento de imagen.* Realiza las siguientes funciones principales:
 - Control de la adquisición de las imágenes mediante la tarjeta capturadora y control del disparo de los proyectores estroboscópicos del sistema de iluminación.
 - Aplicación del algoritmo de procesamiento sobre las imágenes adquiridas.
 - Obtención del metraje de la bobina mediante el acceso al PLC de control a través de la *aplicación de comunicación con el PLC de control*.
 - Obtención de información de datos y eventos de producción mediante el acceso a la base de datos.
 - Generación y almacenamiento de los resultados del procesamiento en la base de datos y en el servidor repositorio de ficheros.
- *Aplicación de comunicación con el PLC de control.* Aplicación que funciona como interfaz de datos entre el PLC de control del sistema de inspección y aplicaciones que requieran un acceso de lectura y escritura de variables localizadas en el PLC. La comunicación con el PLC se realiza a través de una tarjeta de comunicación serie RS-422/485 instalada en el PC de adquisición y procesamiento.
- *Aplicación de monitorización y supervisión del operador de control de calidad.* Interfaz de usuario con dos funciones principales:
 - Muestra datos y resultados de la bobina que está siendo procesada en la línea de producción. Para ello utiliza información generada por la *aplicación de adquisición y procesamiento de imagen* e información extraída de la base de datos.
 - Control del servomecanismo. Realiza el control del servomecanismo y el acceso a información sobre el estado y posibles errores en el que se puede encontrar el sistema. Estas operaciones se realizan mediante el acceso al PLC de control a través de la *aplicación de comunicación con el PLC de control*.

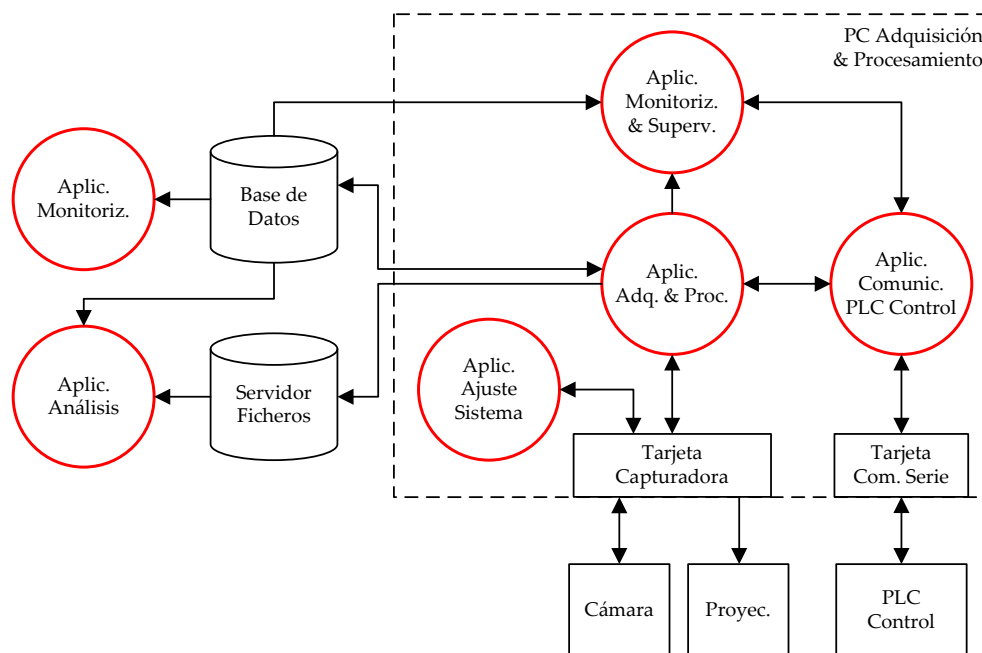


Figura 9.17: Esquema general del software del sistema de inspección.

- *Aplicación de ajuste del sistema de inspección.* Interfaz de usuario para asistir al personal de mantenimiento en el ajuste del sistema de inspección. Dispone de unas funciones de adquisición y procesamiento de imagen dedicadas.
- *Aplicaciones de monitorización y análisis y consulta de datos históricos.* Interfaces de usuario para la monitorización remota del sistema de inspección y el análisis y consulta de datos históricos de bobinas ya procesadas en la línea de producción. La información requerida por estas aplicaciones se obtiene de la base de datos y el servidor de ficheros.

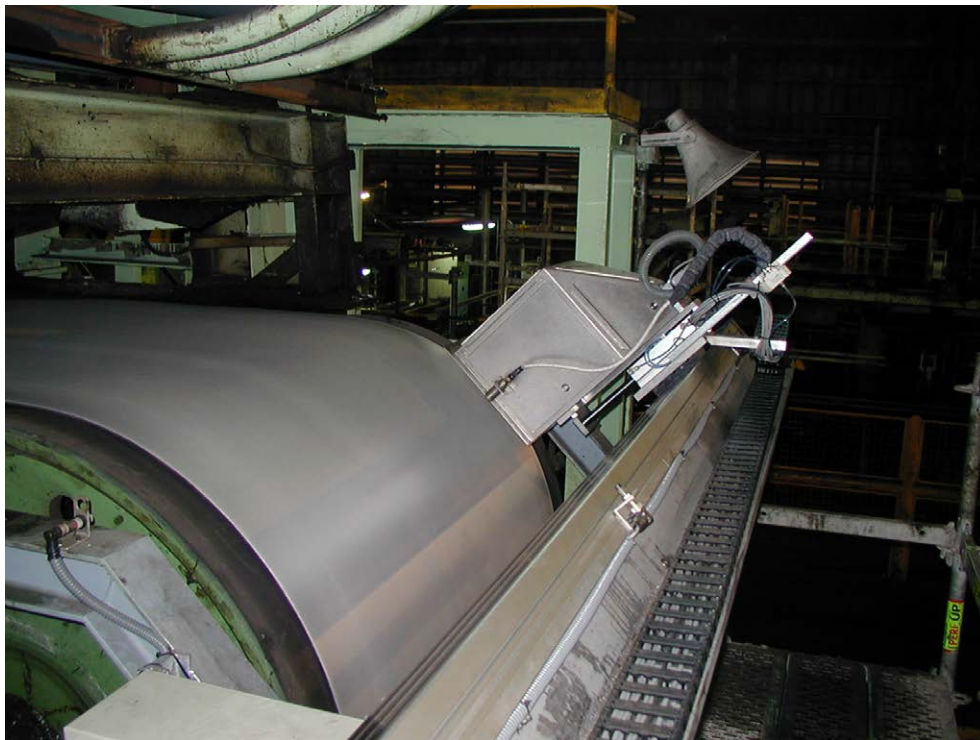
9.6 SISTEMAS DE INSPECCIÓN IMPLANTADOS.

Como se comentó al principio del capítulo, actualmente se tienen tres sistemas de inspección instalados en funcionamiento. A continuación se muestran una serie de imágenes de los tres sistemas instalados en sus respectivas ubicaciones:

1. Sistema de inspección en línea AP2 de la factoría *Acerinox Europa, S.A.U.* en Los Barrios (Cádiz). En operación desde septiembre de 2007 (figura [9.18](#)).
2. Sistema de inspección en línea AP1 de la factoría *Columbus Stainless, (Pty) Ltd.* en Middelburg (República de Sudáfrica). En operación desde octubre de 2008 (figura [9.19](#)).
3. Sistema de inspección en línea P4 de la factoría *Acerinox Europa, S.A.U.* en Los Barrios (Cádiz). En operación desde septiembre de 2013 (figura [9.20](#)).



(a) Vista de superior.



(b) Vista lateral.

Figura 9.18: Sistema de inspección línea AP2 (*Acerinox Europa, S.A.U.*).



Figura 9.19: Sistema de inspección línea AP1 (*Columbus Stainless, (Pty) Ltd.*).



(a) Vista anterior lateral.



(b) Vista posterior.

Figura 9.20: Sistema de inspección línea P4 (*Acerinox Europa, S.A.U.*).

VALIDACIÓN

La verificación de la metodología propuesta se ha realizado de forma experimental de dos maneras diferentes:

- *Validación en laboratorio.* Basada en el análisis de los resultados de la metodología de detección propuesta aplicada sobre una serie de placas de muestra suministradas por el fabricante de acero inoxidable. En estas placas, personal experto en calidad del laboratorio metalúrgico del fabricante ha identificado y marcado manchas de distinto tamaño correspondientes con óxido residual. Para realizar el análisis, se monta un banco de pruebas en laboratorio con la caja difusora y se fijan las placas de muestra a la distancia de trabajo.
- *Validación del sistema de inspección instalado en factoría.* El sistema de inspección visual automatizado es instalado y puesto en funcionamiento en la línea de producción para su análisis durante el funcionamiento (*online*) y el análisis de los datos recopilados de bobinas que han sido inspeccionadas por el sistema (*offline*). En todo momento, se es asistido por un experto de control de calidad realizándose un análisis pormenorizado de la información que genera el sistema.

10.1 VALIDACIÓN EN LABORATORIO.

La validación de la metodología en el laboratorio requiere el montaje de un banco de pruebas. El banco de pruebas está formado por la caja difusora, el PC de adquisición y procesamiento y las placas de muestra del fabricante con unas dimensiones aproximadas de 100×100 mm.

La colocación de las placas de muestras del fabricante (figura 10.1) se realiza de manera que la distancia entre la cámara industrial y las placas sea la distancia de trabajo del sistema $d_{obj} = 300$ mm.

10.1.1 Procedimiento de validación.

Se disponen de ocho placas de muestra con manchas de óxido residual de distinto tamaño con acabados superficiales 1 y 1D, de las cuales, cuatro placas se utilizan para construir un modelo matemático empírico basado en una regresión lineal múltiple, tal y como, se explicó en la sección 8.3.2 del capítulo 8. En total, se disponen de doce subimágenes que contienen manchas de óxido residual para la construcción del modelo.

Una vez construido el modelo, se realiza la validación con las cuatro placas de muestra restantes. Para ello, se aplica el algoritmo de detección de óxido residual a subimágenes que contienen manchas de óxido.

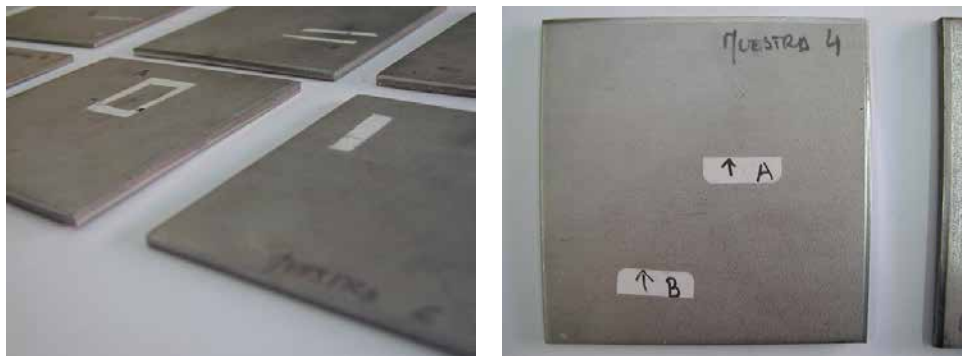


Figura 10.1: Placas de muestra del fabricante.

Posteriormente se calcula el error de clasificación ME, porcentaje de píxeles del fondo asignados erróneamente al objeto segmentado, de todas las subimágenes con óxido aplicando la ecuación 5.1 de la sección 5.2.1 en el capítulo 5.

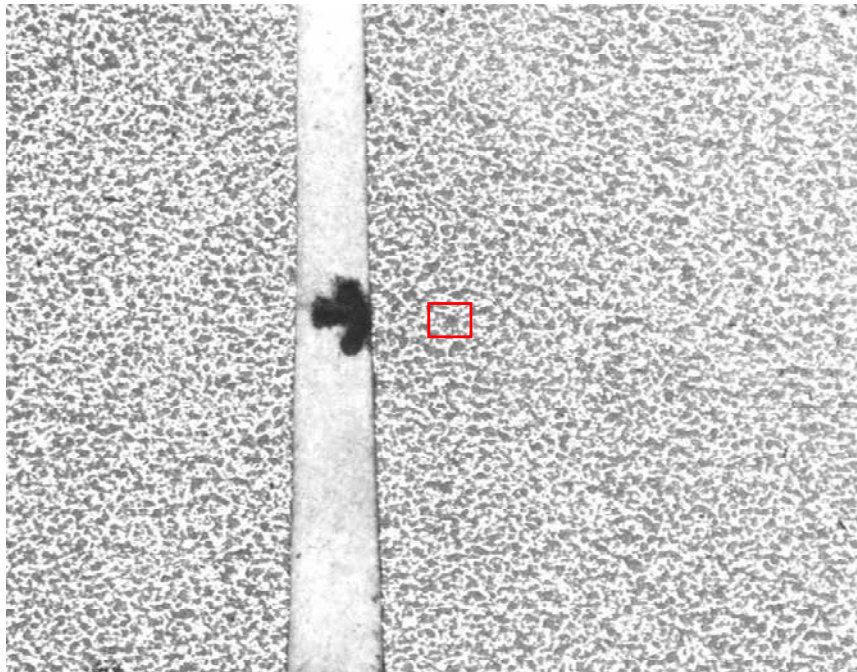
10.1.2 Resultados.

Las figuras 10.2, 10.5 y 10.8 muestran algunas de las imágenes utilizadas para la validación. En cada una de estas imágenes se marcan, mediante un recuadro rojo, la subimagen analizada que contiene una mancha de óxido residual.

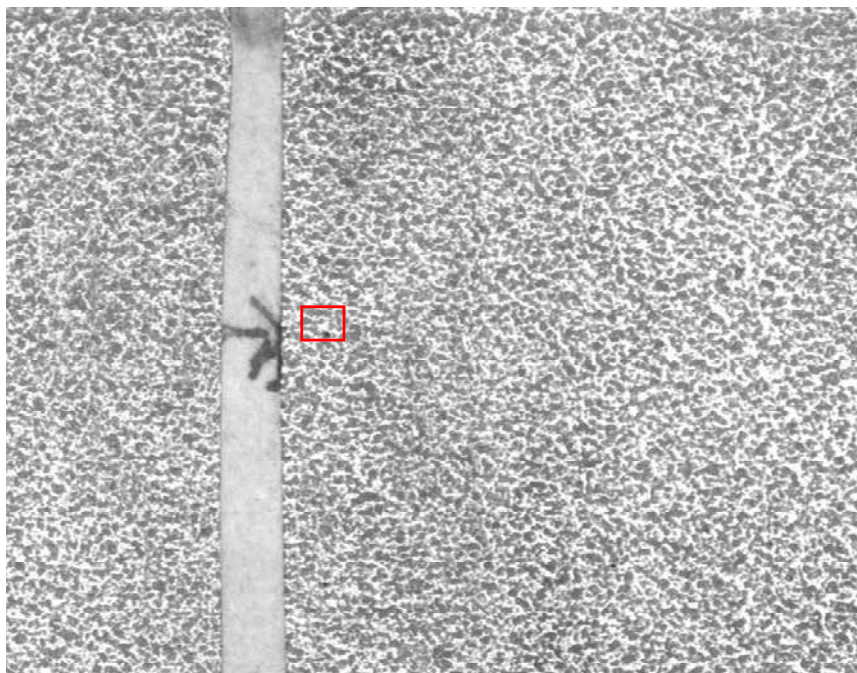
Las figuras 10.3, 10.4, 10.6, 10.7, 10.9 y 10.10 muestran imágenes y gráficos correspondientes con el procesamiento de imagen llevado a cabo sobre las subimágenes analizadas. Estos elementos son los siguientes::

- *Subimagen real.* Se indica la posición de la subimagen dentro de la imagen completa (fila y columna de las 20×20 subimágenes en las que se divide la imagen).
- *Subimagen procesada.* Resultado de aplicar el algoritmo de detección de óxido sobre la imagen real (preprocesamiento, segmentación y postprocesamiento).
- *Histograma subimagen.* Histograma de la subimagen real donde se marca, mediante una línea roja, el umbral T utilizado para la binarización de la imagen y en color verde el rango dinámico de búsqueda del umbral.
- *Histograma subimagen filtrado.* Este es el histograma filtrado donde se realiza la búsqueda del umbral T^* dentro del rango dinámico delimitado por las líneas verdes. El umbral T^* se corresponde con el valle más profundo (marcado con una línea roja). El umbral T se obtiene restándole al umbral T^* el retardo introducido por el filtro FIR.

Los gráficos muestran un excelente comportamiento del algoritmo en la búsqueda del umbral T^* corroborado posteriormente cuando se compara la imagen real con la procesada. Respecto al error de clasificación calculado a partir del conjunto total de subimágenes que contienen manchas de óxido, se ha obtenido un resultado de $[ME]_{\%} = 0,0992\%$ lo que indica un excelente rendimiento del funcionamiento del algoritmo de detección.



(a) Muestra 1a.



(b) Muestra 1b.

Figura 10.2: Muestras 1a y 1b.

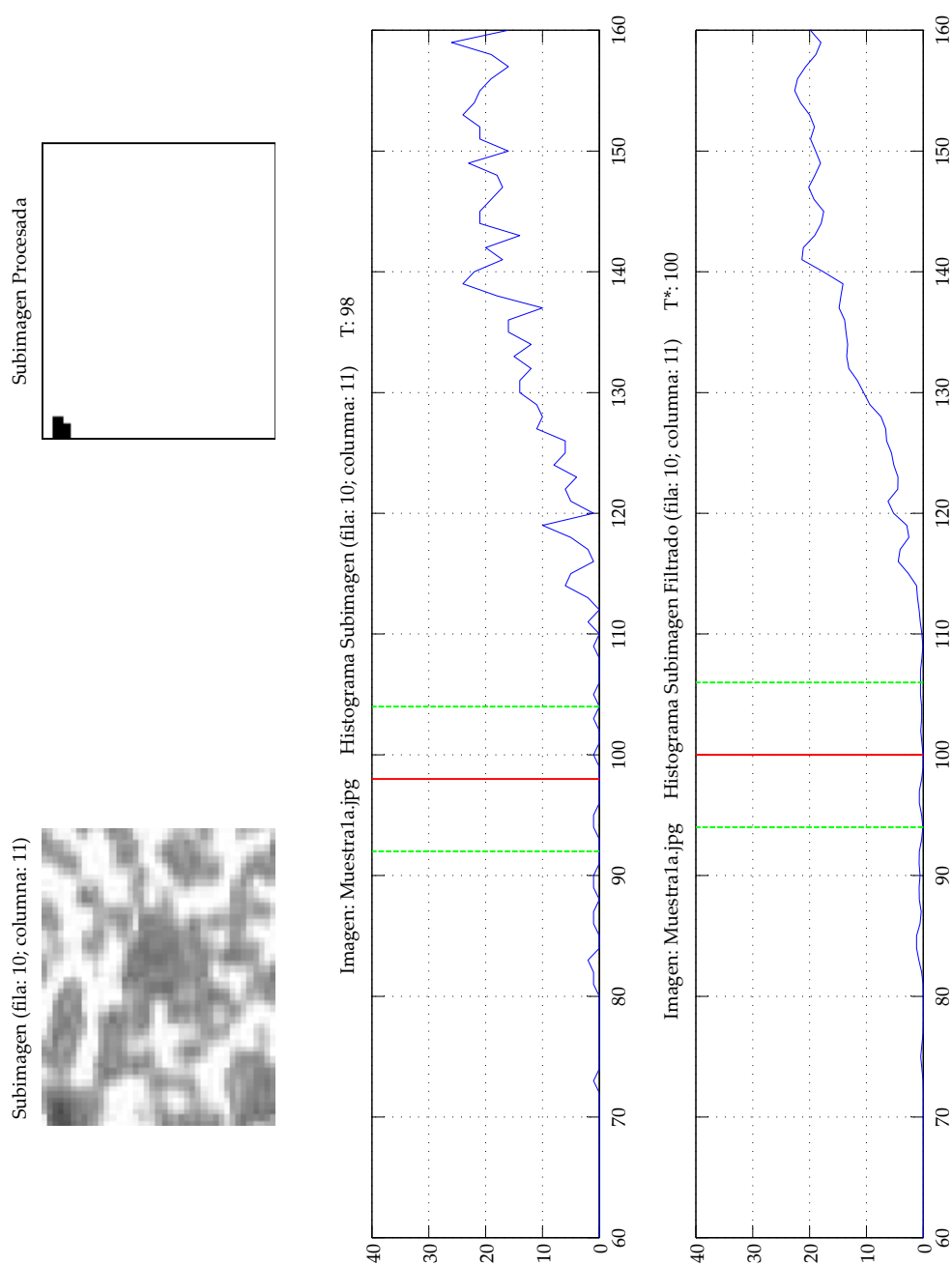


Figura 10.3: Procesamiento de imagen muestra 1a (óxido residual).

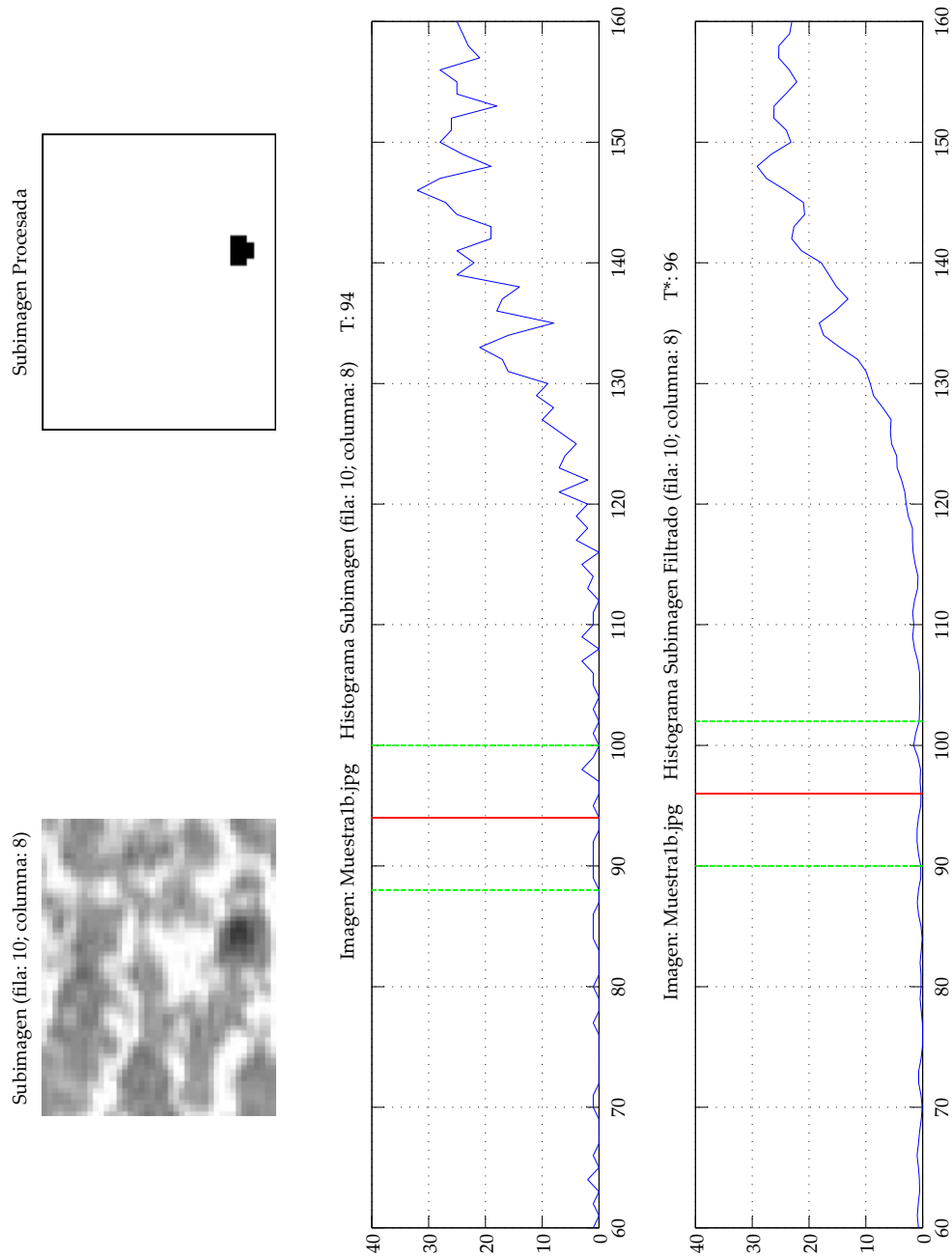
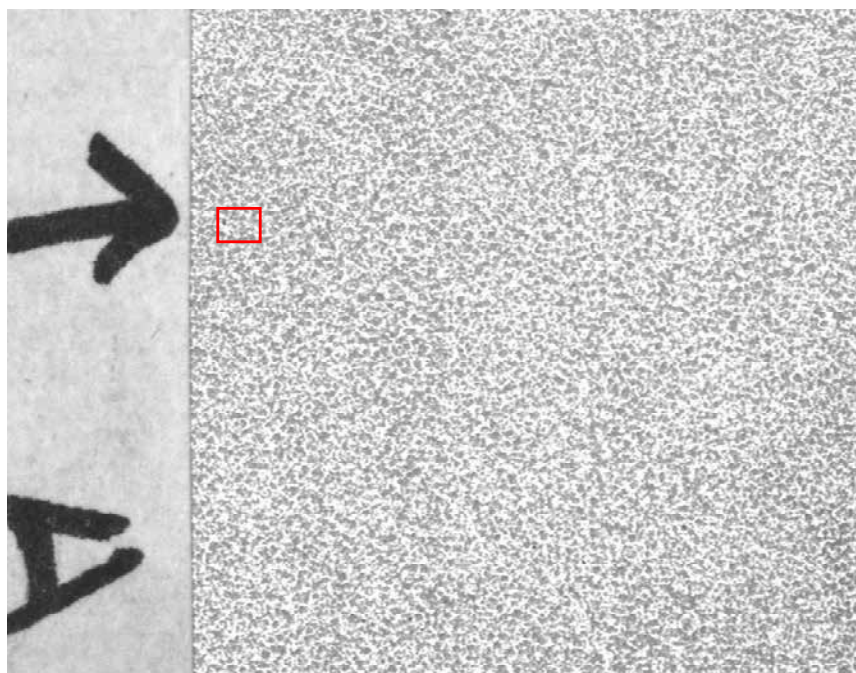
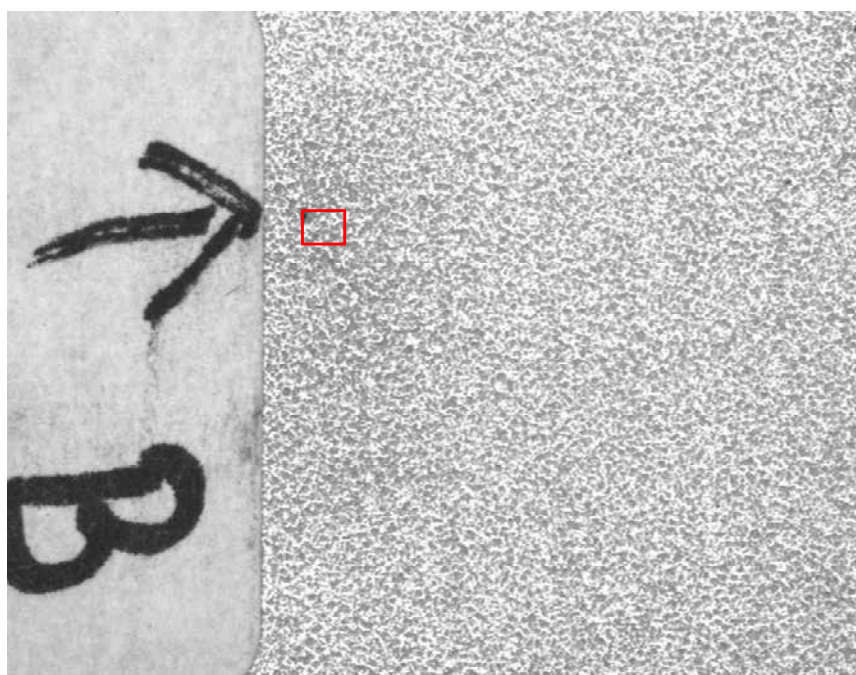


Figura 10.4: Procesamiento de imagen muestra 1b (óxido residual).



(a) Muestra 4a.



(b) Muestra 4b.

Figura 10.5: Muestras 4a y 4b.

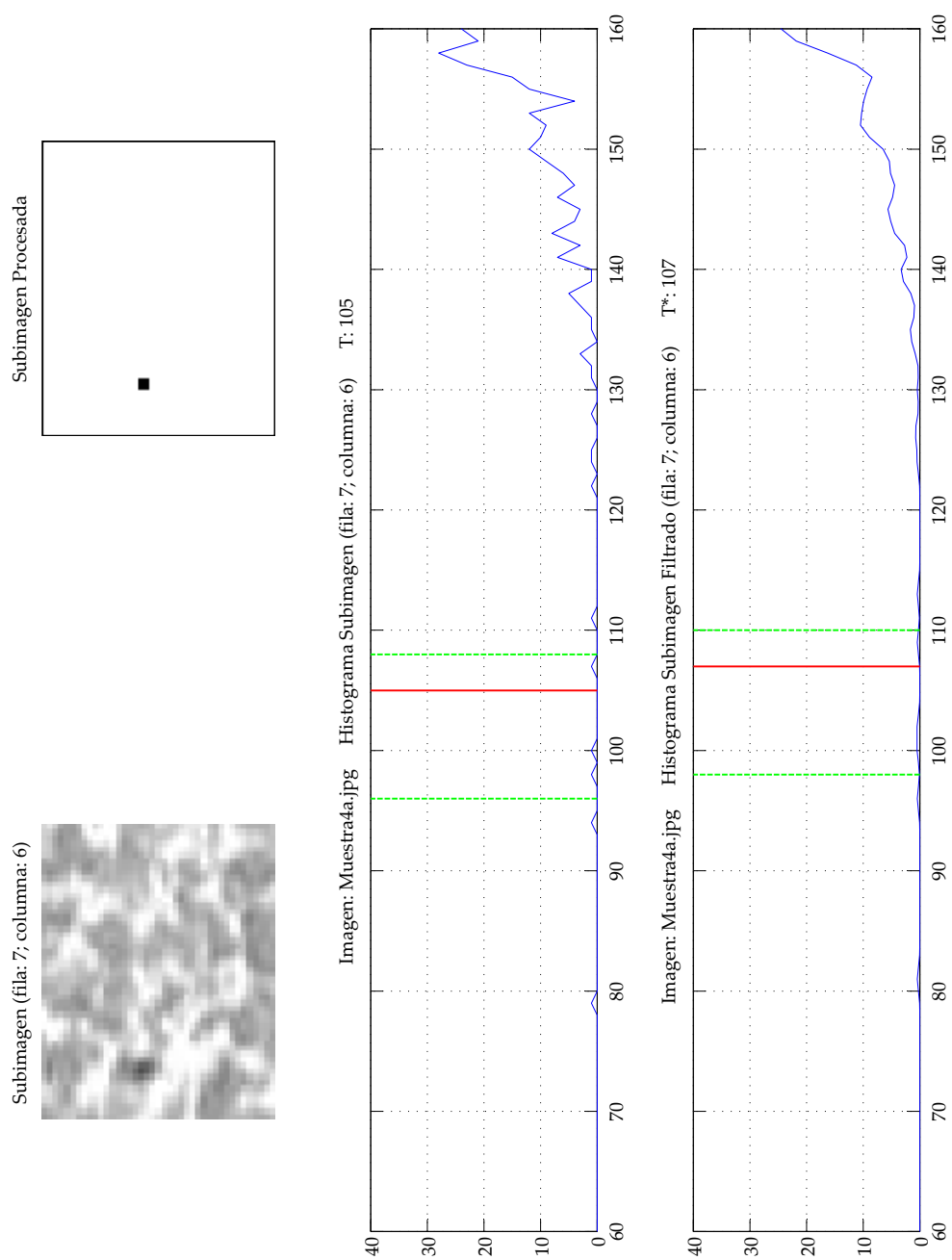


Figura 10.6: Procesamiento de imagen muestra 4a (óxido residual).

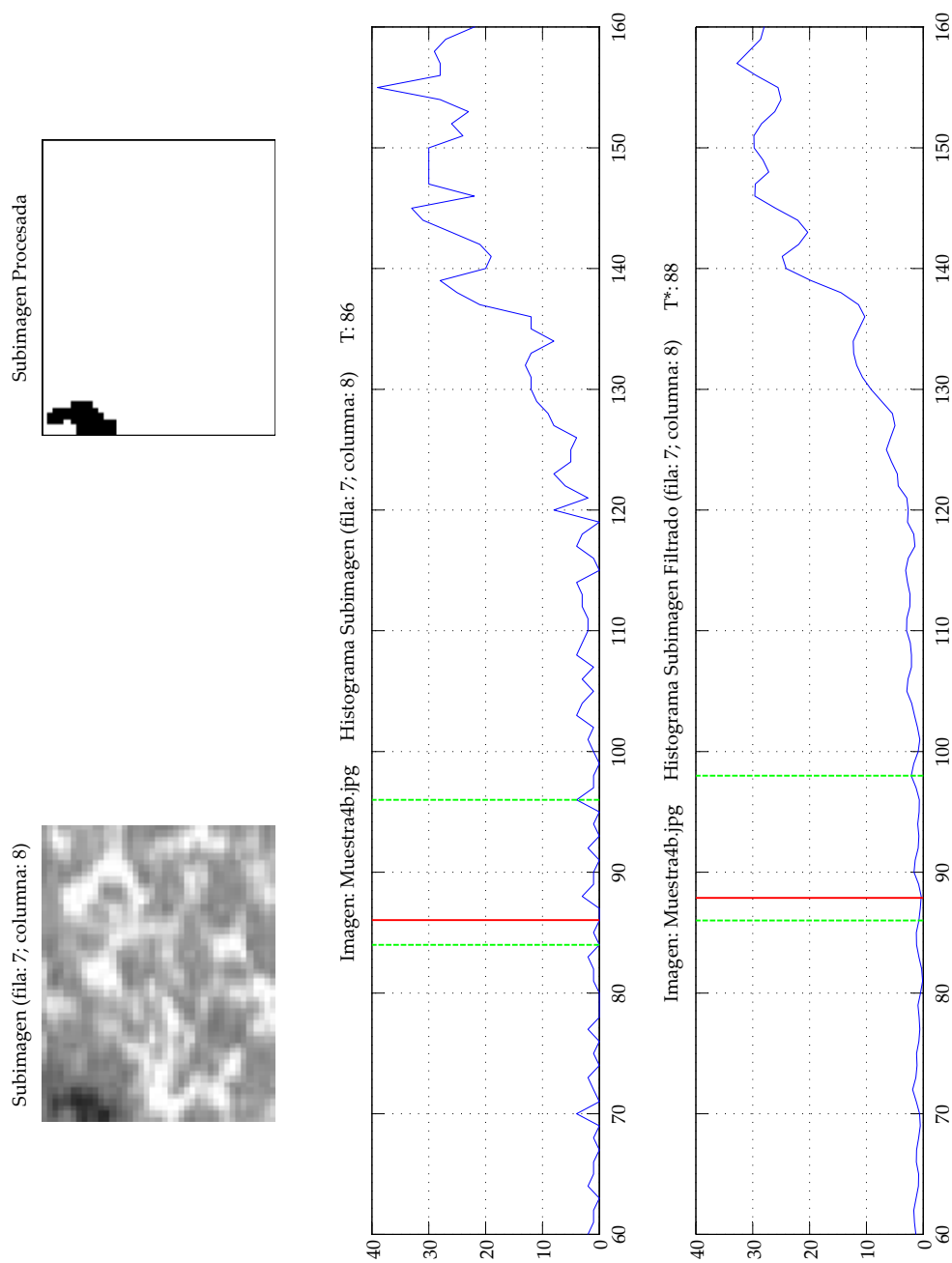
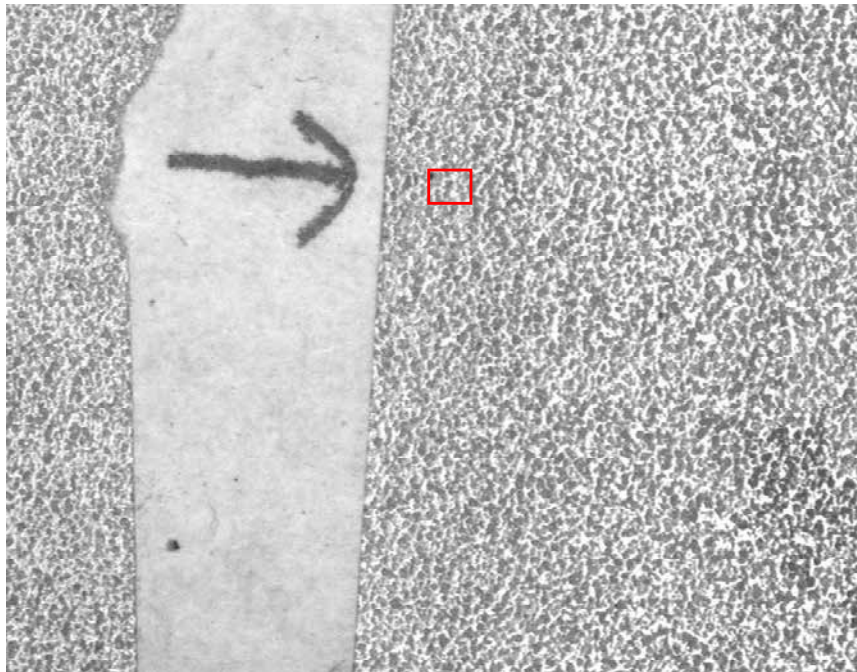
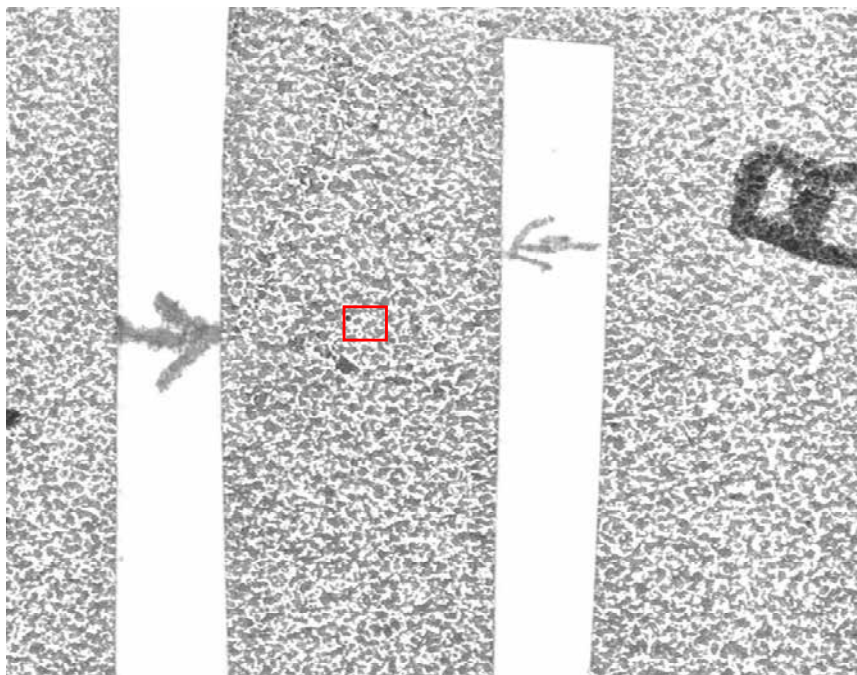


Figura 10.7: Procesamiento de imagen muestra 4b (óxido residual).



(a) Muestra 7.



(b) Muestra 8ab.

Figura 10.8: Muestras 7 y 8ab.

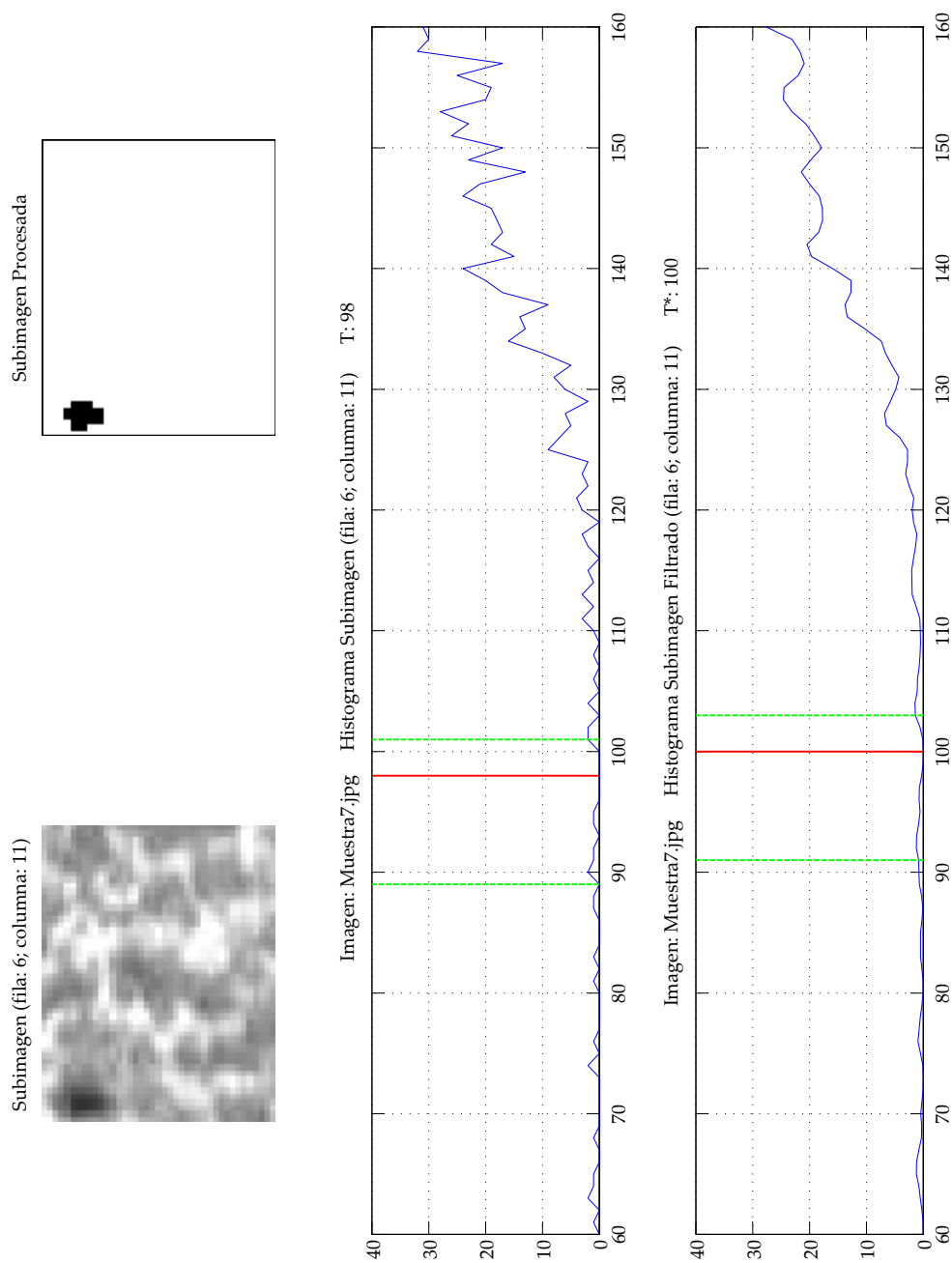


Figura 10.9: Procesamiento de imagen muestra 7 (óxido residual).

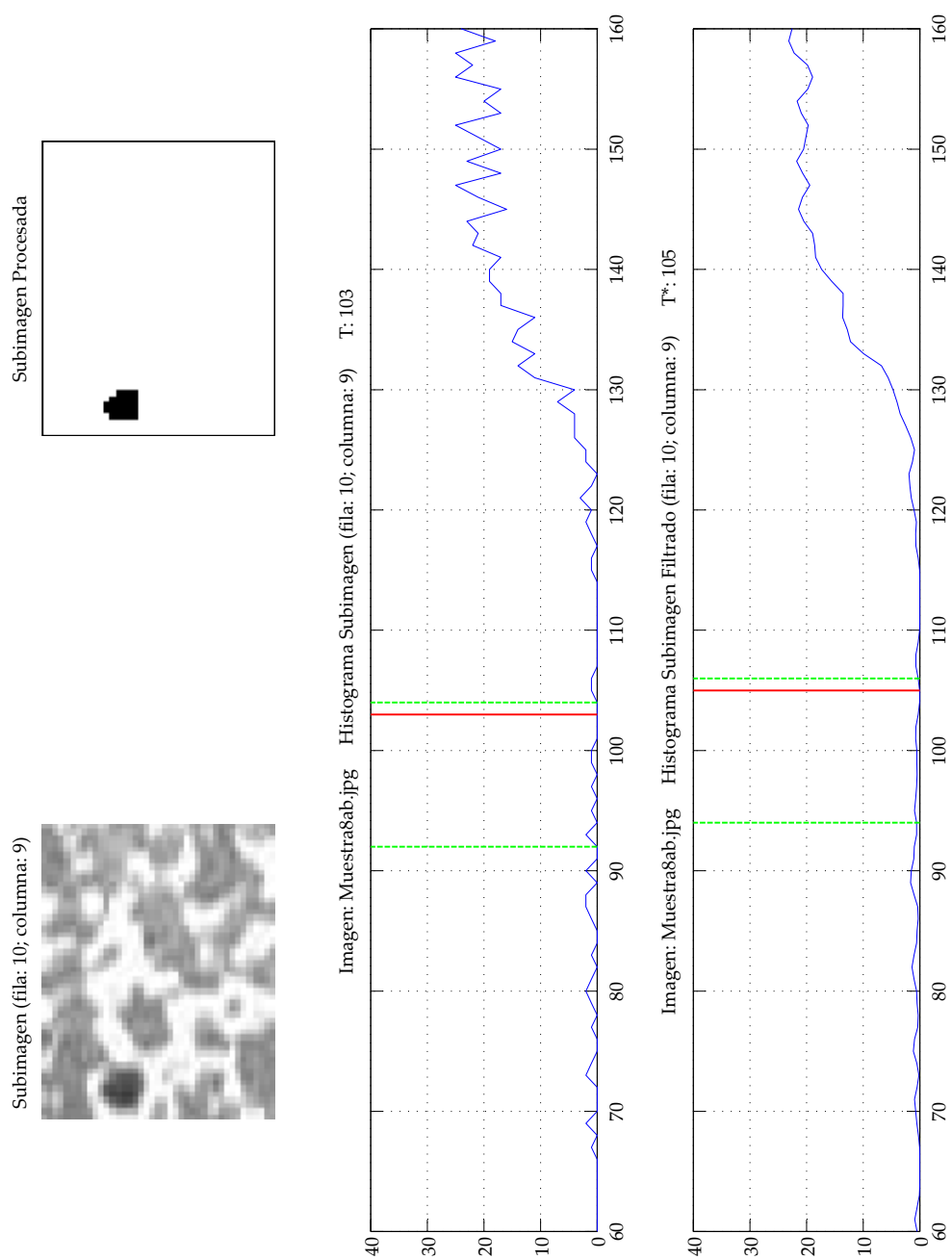


Figura 10.10: Procesamiento de imagen muestra 8ab (óxido residual).

10.2 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN INSTALADO EN FACTORÍA.

Una vez que el sistema se ha implementado, instalado y puesto en funcionamiento en la línea de producción se dispone de un excelente banco de pruebas para realizar su validación bajo las condiciones de operación para las que fue inicialmente diseñado.

La asistencia del experto en calidad es crucial de cara a la validación, tanto si se están analizando los resultados que está generando el sistema durante la inspección de las bobinas, como si se analizan una vez procesadas.

10.2.1 *Consideraciones previas.*

El principio fundamental del sistema de inspección para poder detectar manchas de óxido residual se basa en el contraste existente entre éstas y la superficie homogénea de la bobina de acero inoxidable.

Este contraste respecto a la superficie de la bobina no es exclusivo del óxido residual. Cualquier otro tipo de mancha (agua, aceite, grasa, etc.), deposición de material (polvo, lodo, pequeños objetos, etc.), defectos (soldaduras, agujeros, grietas, grandes manchas de óxido, etc.) y el propio tensor o rodillo donde va abrazada la banda podrían contrastar con la superficie y ser detectados como óxido residual cuando realmente no lo son¹.

Uno de los motivos de ubicar el sistema a la salida de la sección de decapado y secado de la línea de producción era disponer, lo antes posible, de información sobre el grado de incidencia del óxido residual, de manera que, el operador de control de calidad pudiera anticiparse y aplicar medidas correctivas del defecto.

Otro de los motivos, no tan explícito, consiste en reducir o limitar la posible inconsistencia de los resultados obtenidos por el sistema de inspección, es decir, aquellos elementos que contrastan con la superficie y que pudieran considerarse erróneamente como óxido residual.

Así, se consigue que la banda de acero salga completamente limpia del último tanque de la sección de decapado sin manchas de aceite y grasa, sin deposiciones de polvo y lodo y evitando la posibilidad de que se pueda adherir cualquier otro tipo de objeto. Seguidamente al último tanque² se encuentra la sección de secado donde la banda, que sale mojada por el agua del tanque, es completamente secada eliminando, de esta manera, cualquier mancha de agua que pudiera aparecer sobre la superficie.

Una vez eliminados estos elementos, la siguiente operación consistirá en discriminar imágenes del tensor o imágenes con defectos que podrían ser detectados como óxido residual. La solución no es sencilla y requiere el análisis de las imágenes adquiridas durante la etapa de procesamiento de imagen.

¹ Ver figuras 7.5a, 7.5b y 7.5c en capítulo 7

² Tanque de enjuague.

10.2.2 *Imágenes adquiridas y procesadas.*

Todas las imágenes adquiridas son analizadas por el sistema de inspección para excluir aquellas cuyos resultados podrían generar algún tipo de inconsistencia. Este tipo de imágenes *conflictivas* pueden estar originadas por:

- Errores durante la adquisición.
- Adquiridas bajo condiciones de iluminación no homogéneas.
- Capturan superficie del tensor o parte de ésta.
- Contienen defectos.

Si este tipo de imágenes se procesaran completamente por el algoritmo de detección de óxido residual los resultados obtenidos de cada imagen serían inconsistentes invalidando los resultados de la inspección.

La discriminación se realiza estableciendo una serie de criterios que han de superar todas las imágenes adquiridas y procesadas.

Discriminación de imágenes con errores durante la adquisición.

Se tratan de circunstancias eventuales que se producen cuando ocurre un problema durante la adquisición de la imagen. Este problema afecta a la señal de video generada por la cámara produciendo imágenes excesivamente oscuras o excesivamente claras ocasionadas por problemas en la cámara, interferencias que afectan a la señal de video en su recorrido o localizadas en la tarjeta capturadora. El rechazo de estas imágenes resulta de vital importancia ya que podrían contener zonas del histograma completamente saturadas a niveles de 0 o 255.

La detección de este tipo de imágenes es sencilla y bastará con fijar dos valores de umbral correspondientes con la mediana de la imagen. Un primer umbral, por debajo del cual las imágenes se rechazan por ser demasiado oscuras y, un segundo umbral, por encima del cual las imágenes se rechazan por ser demasiado claras.

El valor de este umbral se establece teniendo en cuenta el rango dinámico mayor observado en imágenes que han sido adquiridas correctamente. Este valor, diferencia entre el nivel de gris más oscuro y más claro existente en la imagen, es de aproximadamente 100 niveles de grises.

Discriminación de imágenes adquiridas bajo condiciones de iluminación no homogéneas.

Esta circunstancia se puede producir de dos formas distintas:

- *De forma eventual.* Cuando ocurre un fallo durante el disparo de alguno de los proyectores.
- *De forma permanente.* Cuando existe un desgaste excesivo de alguna de las lámparas de los proyectores.

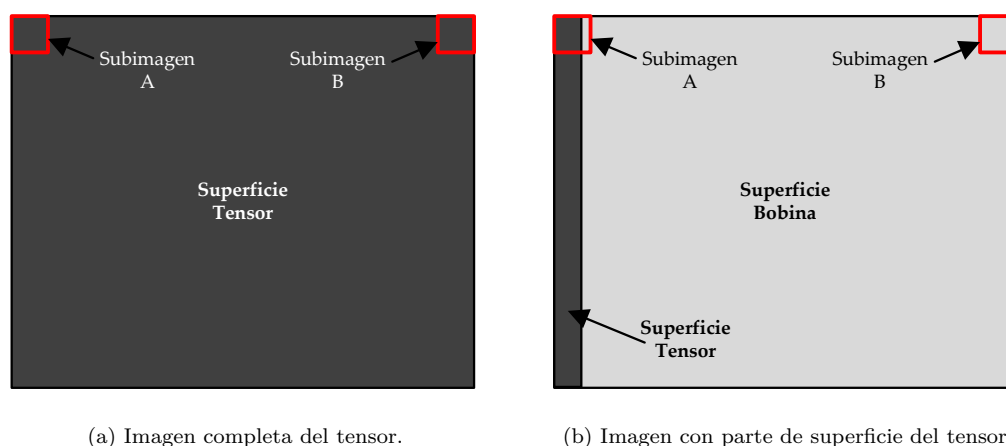


Figura 10.11: Discriminación de imágenes del tensor.

En el primero de los casos, cuando uno o ambos proyectores no disparan, no se ilumina de forma adecuada la zona de inspección dando como resultado imágenes excesiva o completamente oscuras. En el segundo caso, el desgaste progresivo de las lámparas conlleva una adquisición de imágenes cada vez más oscuras.

En ambos casos la discriminación es sencilla, realizándose mediante la fijación de un umbral de mediana. Así, cualquier imagen que tenga un valor de mediana inferior a este umbral será rechazada.

Discriminación de imágenes del tensor.

Cuando se realiza el movimiento de barrido de forma estática se establece una longitud de barrido superior al ancho nominal máximo de las bobinas más un pequeño desplazamiento lateral que puede sufrir la banda durante el proceso de producción. Esta dimensión del barrido origina que se adquieran imágenes de la superficie del tensor o que contienen parte ésta (imágenes del borde de la banda) que deben desecharse.

La detección de estas imágenes se realiza mediante un pequeño análisis previo de las características de dos pequeñas subimágenes localizadas en los laterales de la imagen (subimágenes *A* y *B* en figuras 10.11a y 10.11).

Lo primero que se hace es fijar un umbral que se corresponde con el valor de la mediana de una subimagen considerada superficie del tensor. Así, una subimagen que tenga un valor de mediana inferior a este umbral se considera superficie del tensor y, si es superior, superficie del acero. De esta manera se considerará:

- *Imagen del tensor* (figura 10.11a). Ambas subimágenes están por debajo del umbral definido.
- *Imagen del borde de la banda* (figura 10.11). Una de las subimágenes está por encima del umbral y la otra por debajo.

Discriminación de imágenes con defectos.

La detección y discriminación de defectos se realiza durante la aplicación del algoritmo de detección de óxido residual. En concreto, durante la etapa de preprocesamiento cuando se calculan los índices estadísticos descriptivos de la subimagen (mediana, desviación típica, sesgo y curtosis).

Defectos como soldaduras, agujeros, grietas, grandes manchas de óxido, etc. generan *valores anormales* de la mediana de la subimagen o subimágenes que los circunscriben. Así, agujeros, grietas y manchas de óxido originan valores de mediana de la subimagen muy bajos mientras que las soldaduras generan valores de mediana muy bajos o muy elevados debido a la características topográficas de ésta.

La detección de estos defectos también se puede realizar mediante la fijación de dos umbrales: un umbral inferior y otro superior. Análogamente a los casos anteriores, cuando la mediana de una subimagen es inferior al valor de umbral inferior o superior al valor de umbral superior se considerará que se ha detectado un defecto. En este caso, se detendrá el procesamiento y se rechazará la imagen procediendo a una nueva adquisición de imagen.

10.2.3 Pruebas de validación.

Durante el descascarillado realizado en la sección de descascarillado y decapado de la línea de producción (ver sección 6.2.1 del capítulo 6), se realiza sobre la superficie de la bobina una operación de granallado seguido de un cepillado mediante unos cepillos especiales. Estos cepillos están siempre en contacto con la superficie de la bobina ejerciendo cierta presión sobre ésta.

Este cepillado es de tal importancia que una falta de presión sobre la superficie o un desgaste en alguna parte de los cepillos provoca inmediatamente la aparición de óxido residual sobre la superficie de la banda.

Los cepillos disponen de un sistema de control que permite su accionamiento para ser bajados y puestos en su posición de operación o para ser levantados para la realización de alguna tarea de mantenimiento.

La prueba de validación se va a basar en provocar la aparición de óxido residual durante una serie de metros de bobina y analizar, con un experto de control de calidad, los resultados generados del sistema de inspección. Así, mediante el accionamiento de los cepillos se podrá controlar la aparición del defecto cuando se desee.

10.2.4 Resultados de las pruebas.

Durante las pruebas de validación, el experto de control de calidad constató la detección de manchas de óxido residual por el sistema de inspección, en cantidad y tamaño igual al inspeccionado manualmente mediante lupa. Se estuvieron realizando pruebas de validación durante una semana obteniéndose resultados satisfactorios en todas ellas.

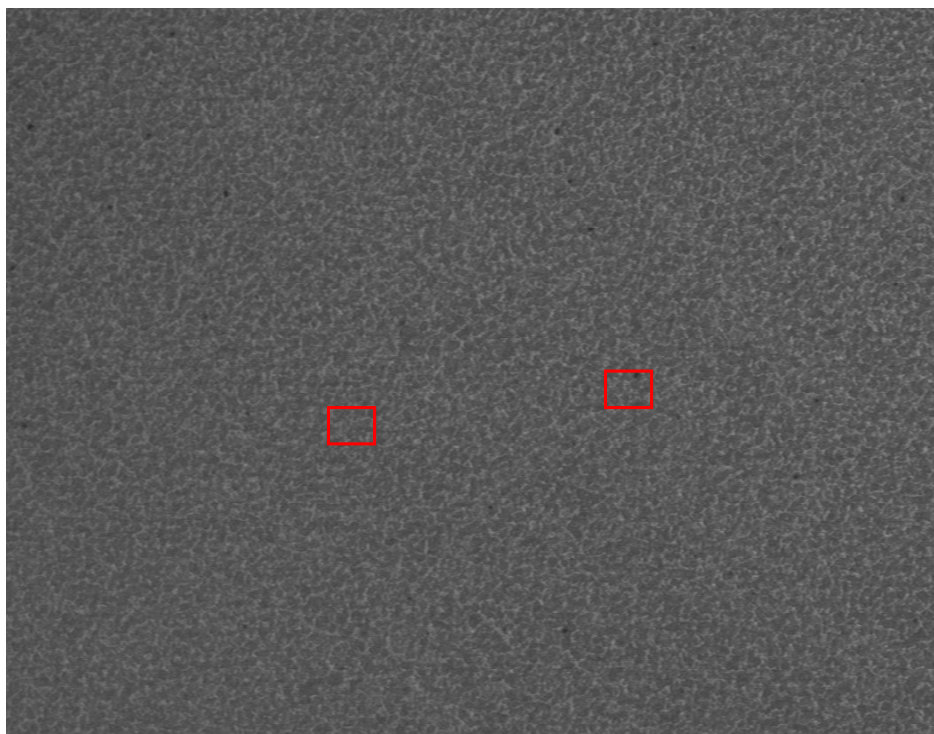
Posteriormente, se analizaron de forma conjunta con el experto los resultados de las bobinas que fueron inspeccionadas durante las pruebas mediante la aplicación de análisis de datos históricos. Durante este análisis, se corroboraron los resultados ya obtenidos durante las pruebas online.

10.2.5 *Resultados del sistema de inspección.*

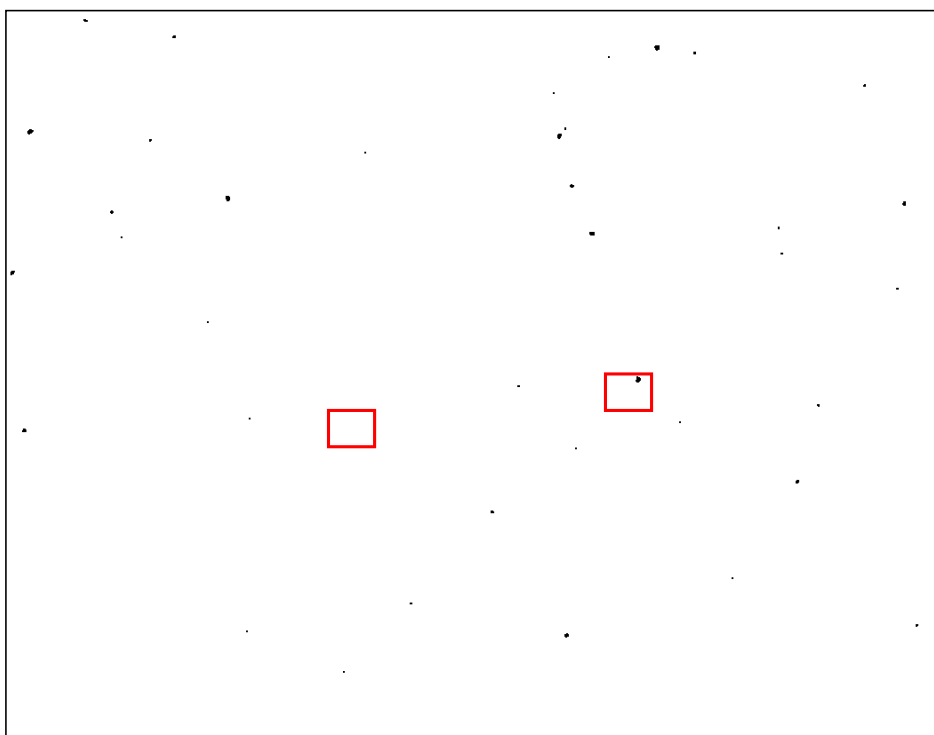
Las figuras 10.12, 10.15 y 10.18 muestran imágenes adquiridas (imagen real) y procesadas (imagen procesada) por el sistema de inspección. En cada figura se han marcado dos recuadros rojos: subimagen que contiene manchas de óxido y subimagen libre de manchas.

Las subimágenes se han procesado generando los gráficos mostrados en las figuras 10.13, 10.14, 10.16, 10.17, 10.19 y 10.20.

Tras el análisis de los resultados se puede concluir que la detección de manchas de óxido residual por el sistema de inspección es enteramente satisfactoria.



(a) Imagen real.



(b) Imagen procesada.

Figura 10.12: Imagen f01841: cuadro derecho con óxido e izquierdo sin óxido.

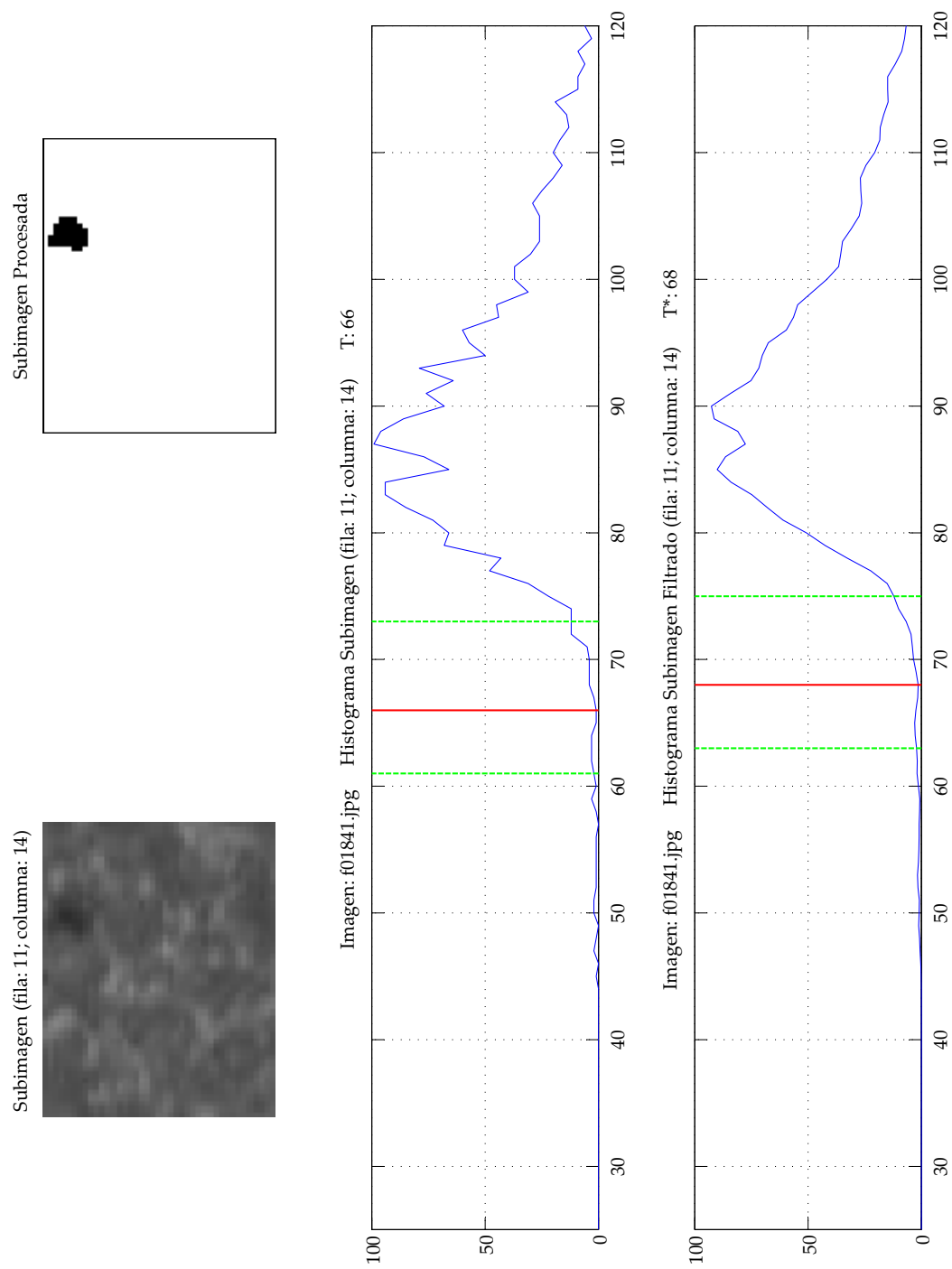


Figura 10.13: Análisis de la imagen f01841 (zona con óxido residual).

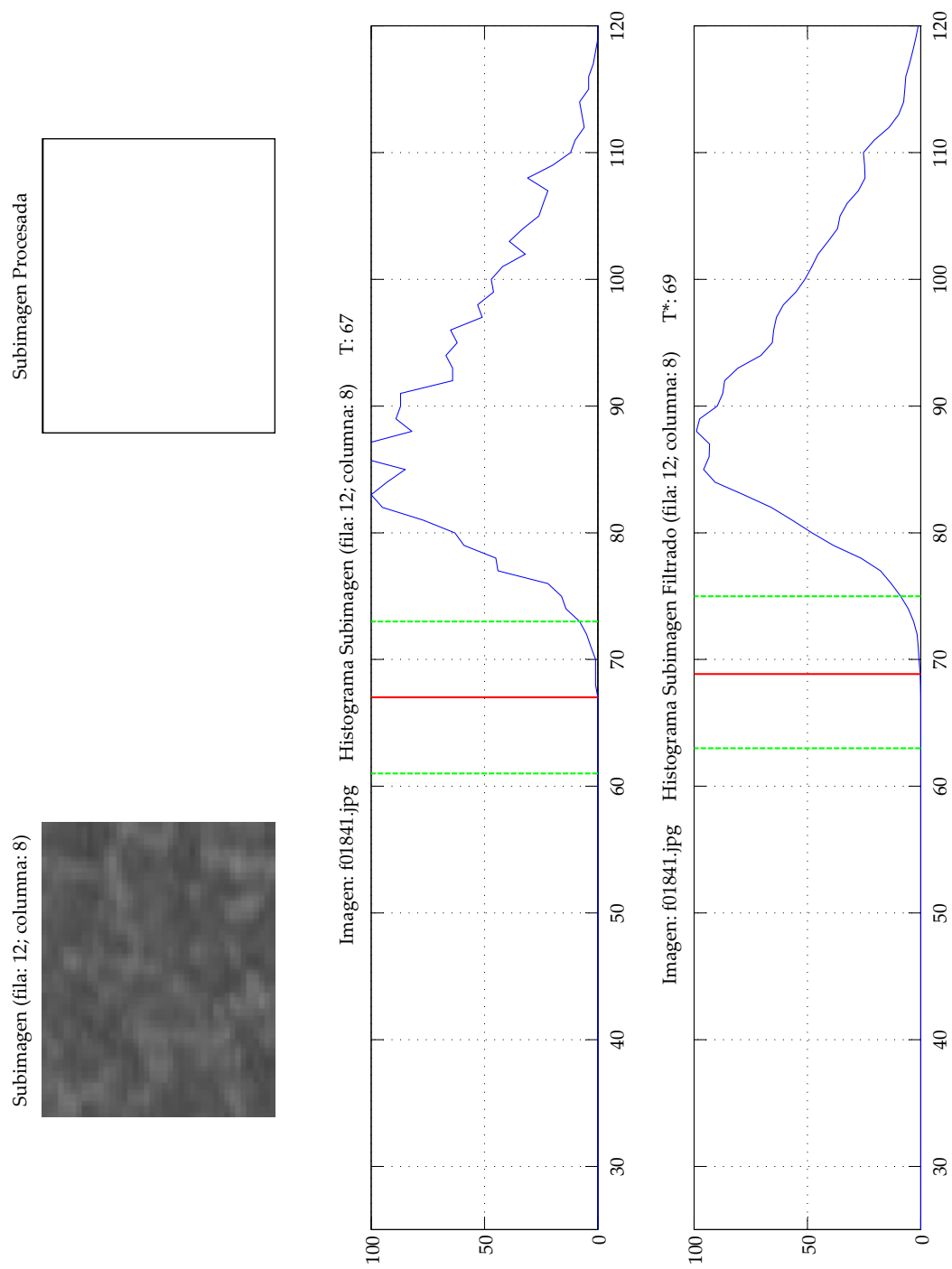
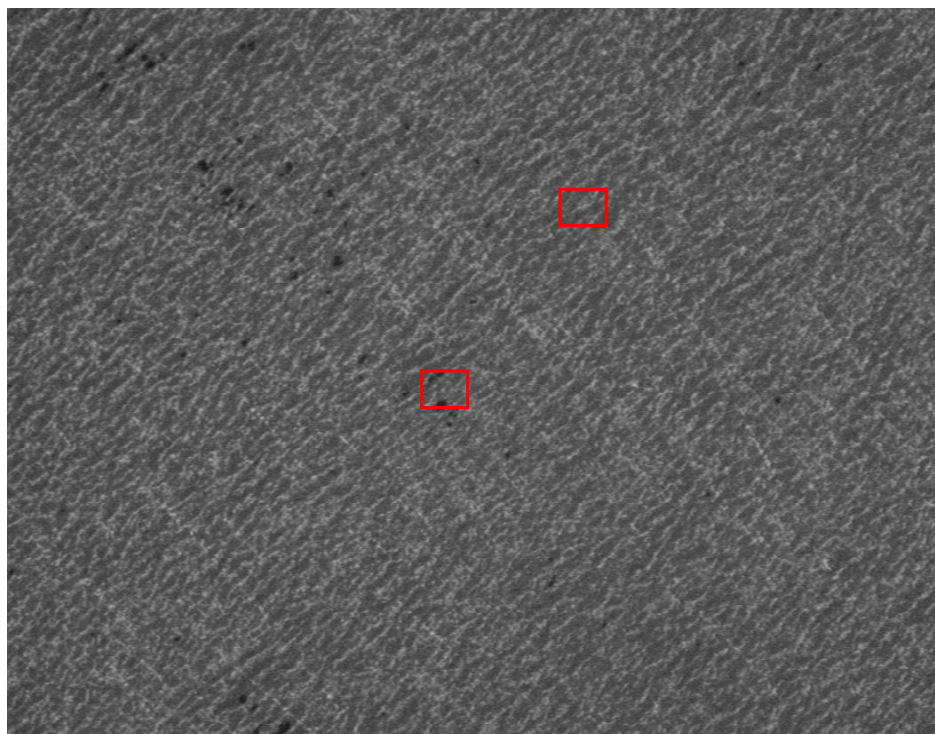
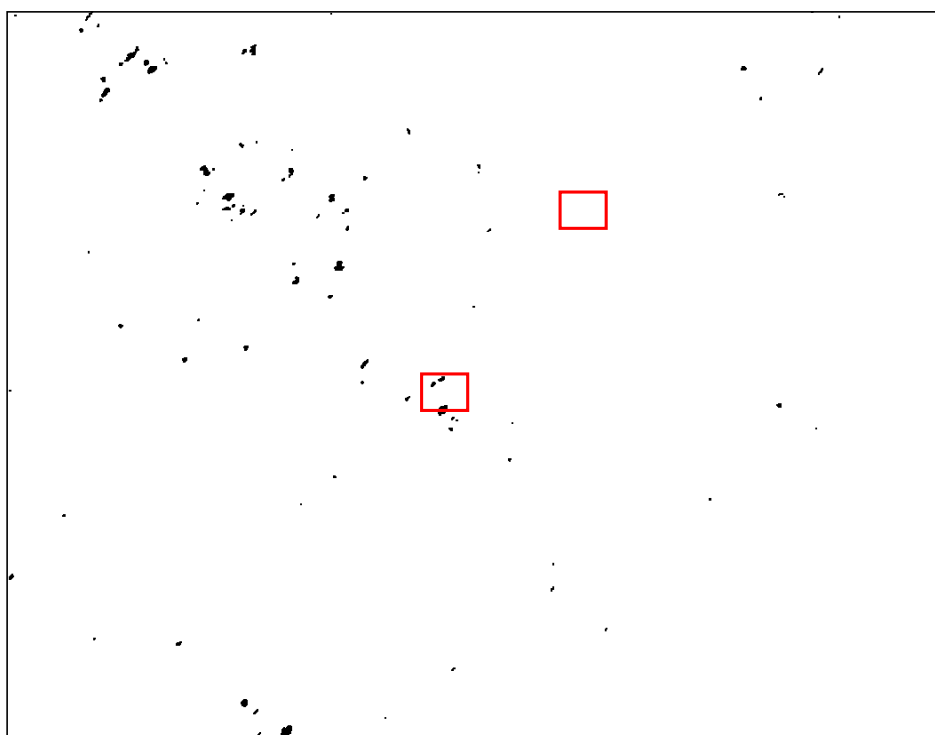


Figura 10.14: Análisis de la imagen f01841 (zona sin óxido residual).



(a) Imagen real.



(b) Imagen procesada.

Figura 10.15: Imagen f02131: cuadro derecho sin óxido e izquierdo con óxido.

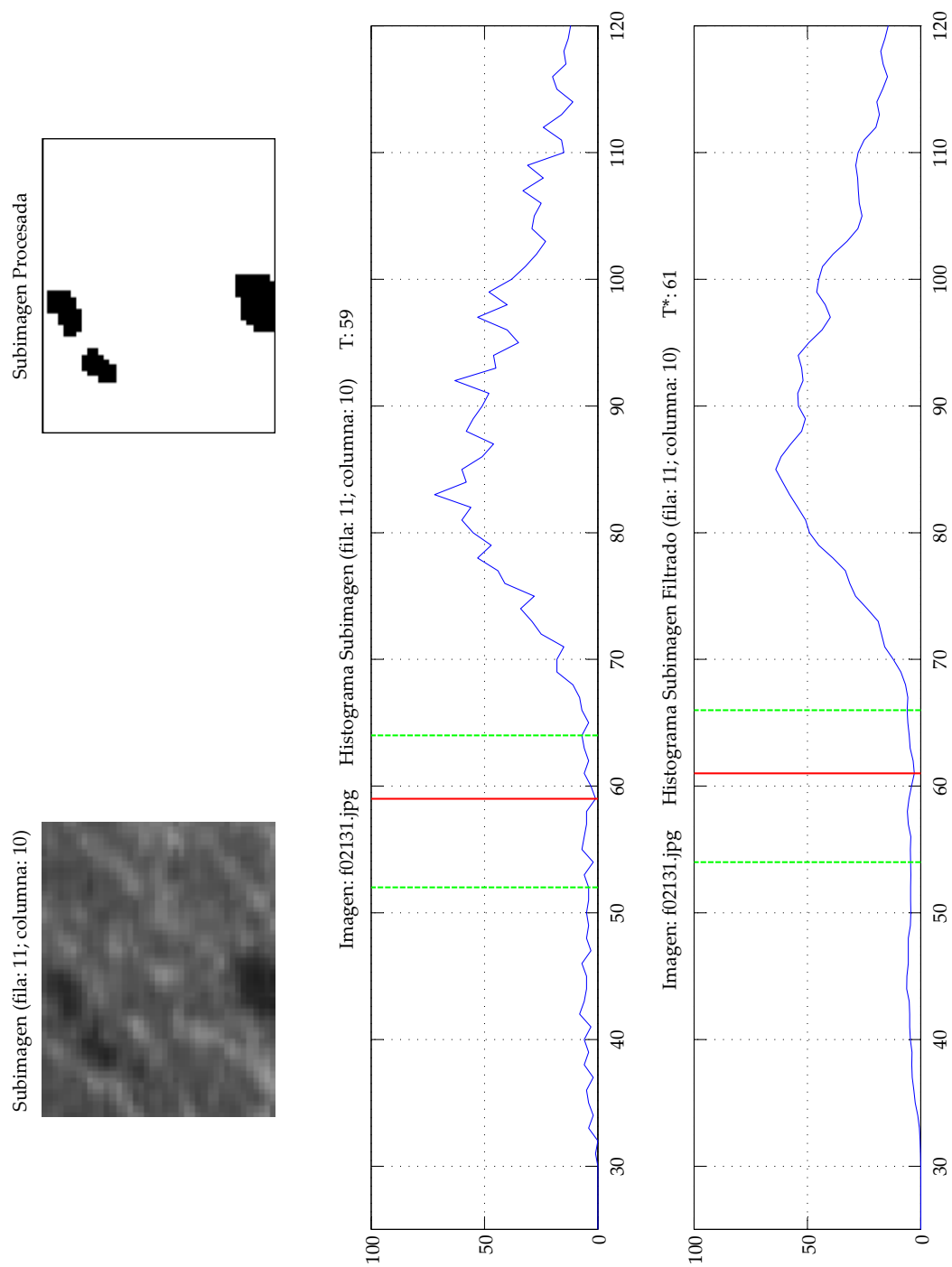


Figura 10.16: Análisis de la imagen f02131 (zona con óxido residual).

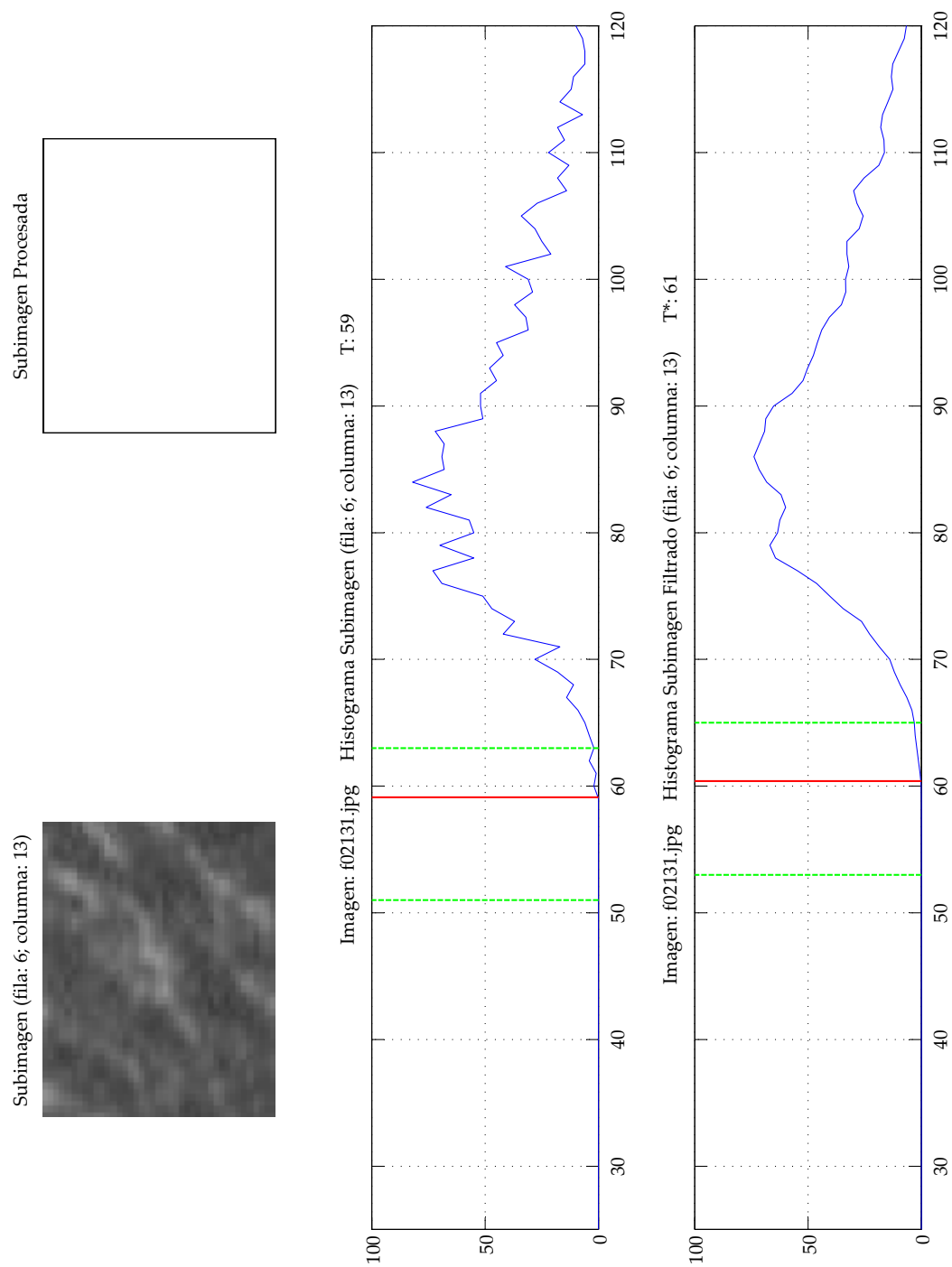
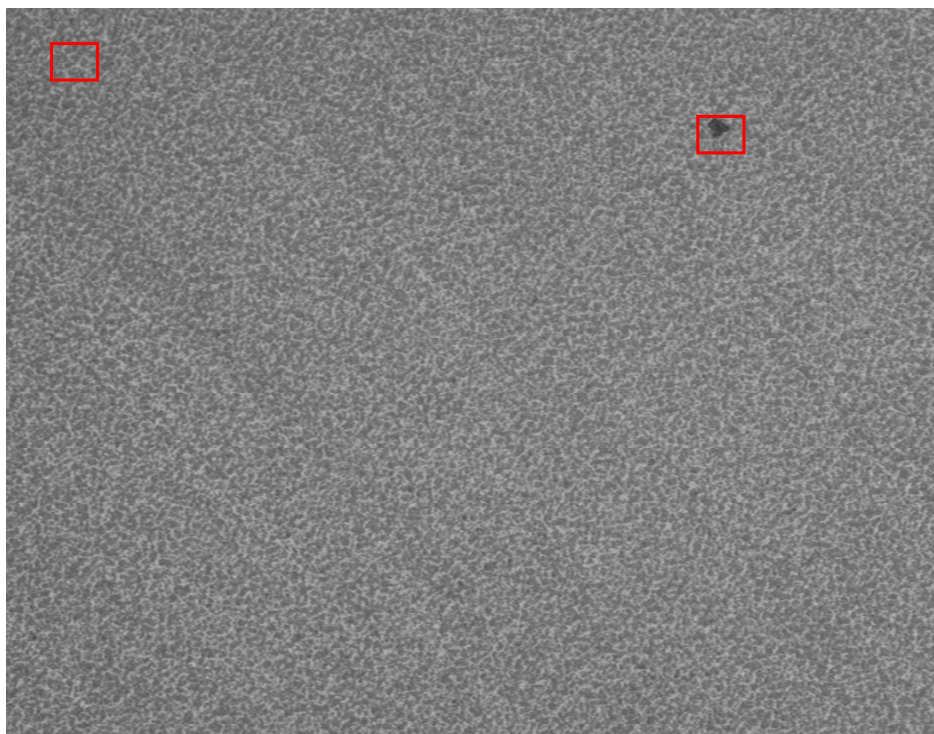
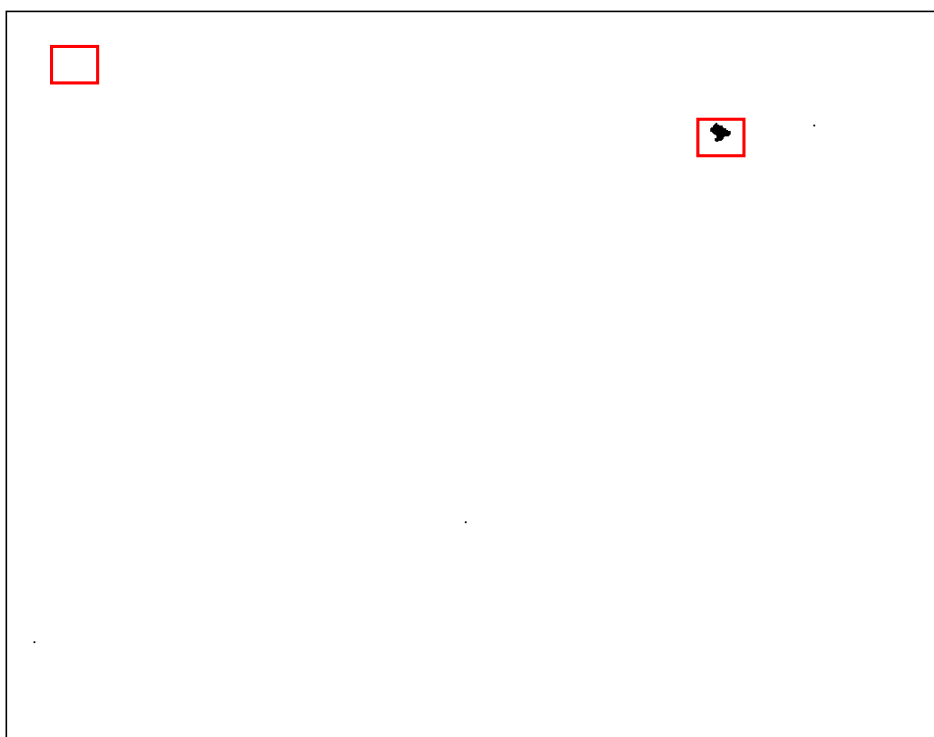


Figura 10.17: Análisis de la imagen `f02131` (zona sin óxido residual).



(a) Imagen real.



(b) Imagen procesada.

Figura 10.18: Imagen f03029: cuadro derecho con óxido e izquierdo sin óxido.

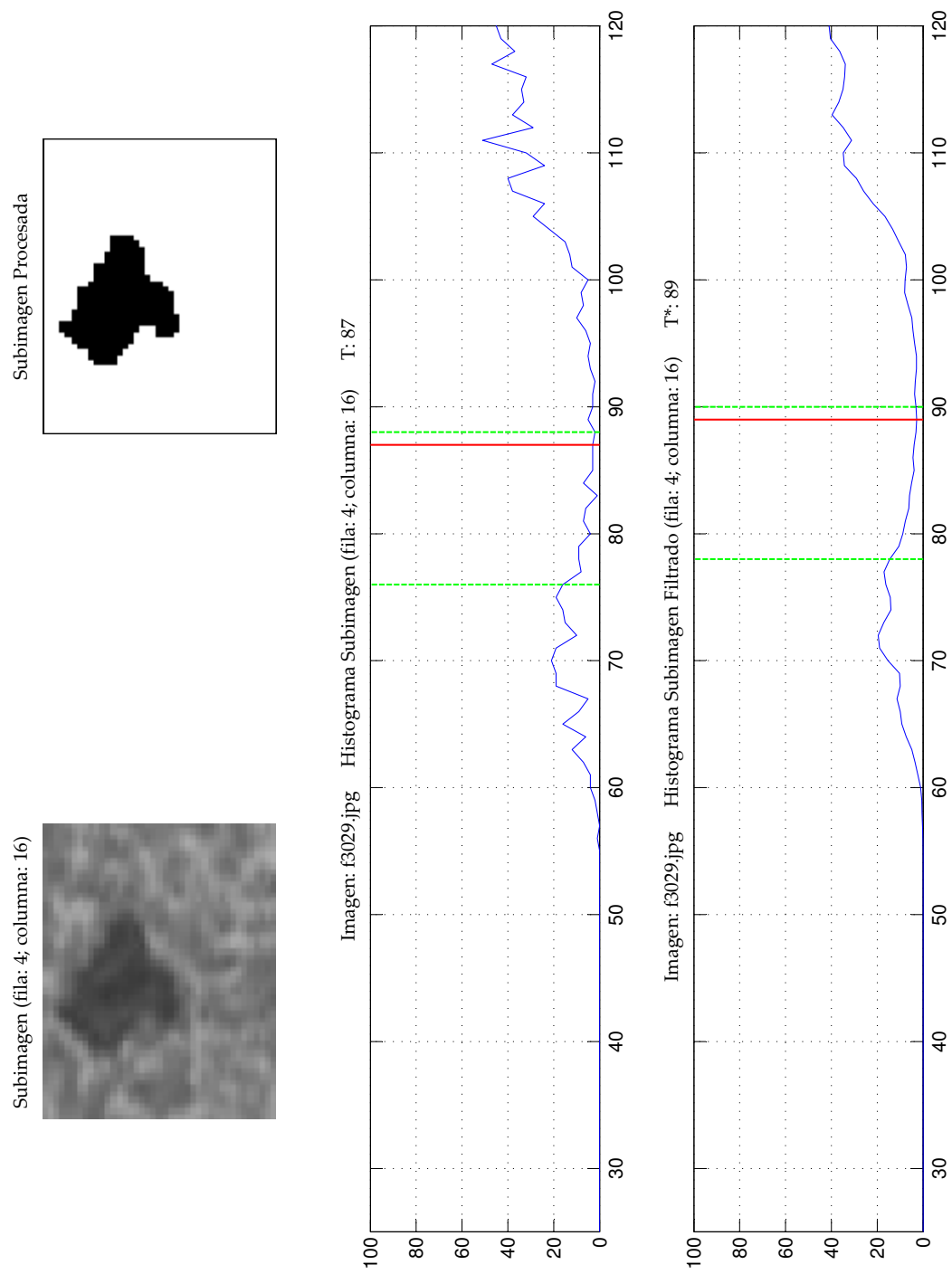


Figura 10.19: Análisis de la imagen f03029 (zona con óxido residual).

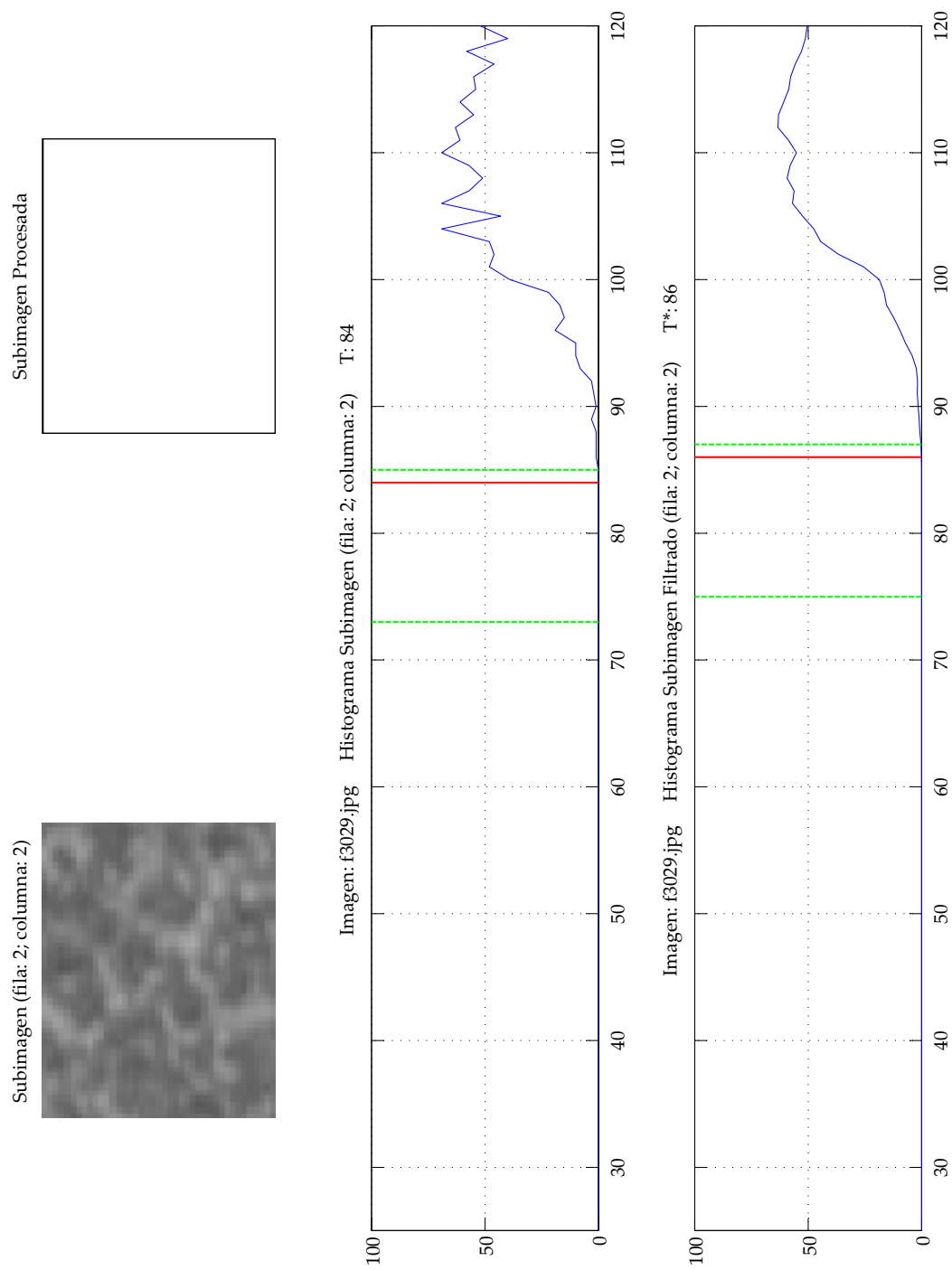


Figura 10.20: Análisis de la imagen f03029 (zona sin óxido residual).

CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral ha propuesto una solución basada en visión por computador para la detección de un defecto superficial, denominado óxido residual, que puede producirse durante el procesamiento de bobinas de acero inoxidable en líneas de recocido y decapado y que supone una alternativa a la detección realizada por un operador humano.

La investigación que conduce a la solución se ha abordado de manera secuencial alcanzándose los dos objetivos fundamentales planteados inicialmente:

1. Se ha propuesto una arquitectura y algoritmo de procesamiento de imagen para la detección de óxido residual basada en visión por computador que:
 - a) Detecta óxido residual sobre superficies de acero inoxidable en movimiento de manera fiable, robusta y eficiente.
 - b) Tiene en cuenta la variedad de tipos y acabados superficiales de acero.
 - c) Cuantifica el óxido residual detectado sobre la superficie y lo clasifica en grupos dimensionales definidos por el fabricante.
 - d) Es viable para su aplicación en un entorno industrial agresivo.
2. Se ha construido e implantado un sistema de inspección visual automatizado basado en la arquitectura y algoritmo de procesamiento propuestos que ha permitido obtener los datos necesarios para su validación.

11.1 PRINCIPALES APORTACIONES.

Las principales aportaciones derivadas de la tesis son las siguientes:

1. Se ha realizado un estudio del arte sobre detección y clasificación de defectos en la producción de acero y otro, más específico, sobre sistemas para la detección de óxido residual en superficies de acero.
2. Se ha diseñado, construido e implantado un nuevo sistema de inspección visual automatizado para la detección y clasificación dimensional de defectos de óxido residual en líneas de recocido y decapado de producción de bobinas de acero inoxidable.
3. Se ha desarrollado una estrategia de procesamiento de imágenes para la detección y clasificación dimensional de manchas de defectos de óxido residual que integra una nueva técnica de segmentación basada en la umbralización automática del histograma a partir de conocimiento empírico.
 - a) Se ha creado una base de conocimiento constituida por índices estadísticos descriptivos extraídos de una población de imágenes previamente caracterizadas por un experto.

- b) Se ha construido un modelo matemático empírico basado en una regresión lineal múltiple para la obtención del rango de búsqueda del umbral de binarización.
 - c) Se ha construido un modelo matemático empírico basado en una red neuronal para la obtención del rango de búsqueda del umbral de binarización.
 - d) Se han comparado los dos modelos encontrándose un mejor comportamiento en el modelo neuronal.
4. Se ha diseñado, simulado e implantado un nuevo sistema de iluminación difusa estroboscópica para inspección de superficies en movimiento basado en el principio de iluminación libre de sombras:
 - Ilumina de forma homogénea la superficie de inspección.
 - Evita la formación de sombras provocadas por la topografía de la superficie del material realizando el contraste entre el defecto y la superficie.
 - Simple y poco voluminoso ya que se encuentra solidario con el movimiento de la cámara industrial reduciendo la superficie necesaria a iluminar y la potencia lumínica requerida.
 - Robusto y protegido para el entorno de trabajo.
 5. Se ha propuesto y desarrollado una estrategia de inspección por muestreo aleatorio simple realizado mediante un movimiento de barrido accionado por un servomecanismo. De esta manera se simplifica la complejidad del sistema agilizando la adquisición y el tratamiento de datos y reduciendo los costes de construcción y mantenimiento del sistema.
 6. Se ha estudiado la influencia de la velocidad de desplazamiento longitudinal de la bobina a su paso por el sistema de inspección y la velocidad de barrido de la superficie de inspección sobre el tiempo de exposición de la cámara y el grado de borrosidad de la imagen.
 7. Se ha diseñado e implementado un proceso automatizado de enfoque de la cámara en entornos industriales para la adquisición de imágenes nítidas de la superficie de inspección basado en el control de posición del movimiento de la cámara. De esta manera, el sistema de inspección se adapta al rango completo de espesores nominales de las bobinas y a posibles desplazamientos de la banda.
 8. Se han analizado los efectos de la curvatura de la superficie de inspección sobre la profundidad de campo (FOV) constatando que se pueden despreciar frente a otros efectos de mayor incidencia como la variación del espesor de las bobinas y posibles desplazamientos de la banda a lo largo del eje óptico de la cámara.
 9. El diseño de la arquitectura de adquisición y procesamiento de imagen, el accionamiento de los movimientos del sistema y la técnica de inspección basada en muestreo aleatorio han dado lugar a una patente internacional reconocida en Europa, Sudáfrica y Japón.
 10. Se ha implementado e implantado el sistema de inspección en dos líneas de la factoría que tiene *Acerinox Europa, S.A.U.* en Los Barrios (Cádiz) y en una línea de la factoría que tiene *Columbus Stainless, (Pty) Ltd.* en Middelburg (República de Sudáfrica). Los tres sistemas se encuentran funcionando en la actualidad.

11. Sustitución del proceso de inspección ocular realizado por el operador de control de calidad de la línea basado en la utilización de una pequeña lupa. De esta manera:

- Se evitan detenciones de la línea para el proceso de inspección ocular aumentando la productividad del proceso de producción.
- Se eliminan problemas e inconvenientes inherentes a la acción del operador humano como la subjetividad de criterio, inconsistencia en la detección, etc.
- No se somete a éste a riesgos innecesarios.

11.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Con un sistema de inspección visual automatizado ya implantado y en funcionamiento en tres líneas de producción se abre un campo para la experimentación que ayuda sobremanera a continuar con la investigación realizada en esta tesis. Destacan las siguientes líneas de investigación:

- *Procesamiento de imagen basado en unidades de procesamiento gráfico GPU.* Se trata de aumentar la velocidad de adquisición y procesamiento de imagen con la finalidad de inspeccionar un mayor porcentaje de superficie de las bobinas mediante el empleo de unidades de procesamiento GPU. De esta manera, el procesamiento de imagen de más bajo nivel y de mayor peso computacional se dedicaría a estas unidades mientras que el de alto nivel a la propia CPU del PC de adquisición y procesamiento.
- *Clasificación de la bobina atendiendo al criterio de calidad final.* Los resultados reportados por el sistema de inspección al operador de control de calidad de la línea de producción muestran los promedios de la densidad de óxido residual $\overline{\rho_i}$ de cada grupo dimensional en cada tramo de estadística. Esta información actualmente asiste al operador en la decisión que tiene que tomar para la asignación cualitativa de la calidad de la bobina. No obstante, esta decisión final podría realizarla el propio sistema de inspección de forma automática eliminando la subjetividad inherente al factor humano.
- *Detección de otros tipos de defectos.* La arquitectura de adquisición y procesamiento de imagen se podría extender a la detección y clasificación de otros tipos de defectos que pueden aparecer sobre la superficie (defectos superficiales, defectos en bordes, defectos de determinado color, etc.).

El sistema de inspección también podría ser adaptado a procesos de producción de otros tipos de materiales, siempre y cuando, se cumpla la condición de existencia de contraste entre superficie y defecto a detectar. De esta manera, procesos de producción continuos como el del aluminio, cobre, papel, plásticos, etc. podrían ser inspeccionados por el sistema adaptándolo a las nuevas características del material, condiciones del entorno y defectos a detectar.

Esta adaptación del sistema puede abrir una nueva línea de investigación hacia el desarrollo de una arquitectura genérica parametrizable del sistema de inspección que lo posibilite para realizar la inspección de otros materiales.

Por último, hay que ser consciente de que la investigación y desarrollo que ha dado lugar a esta tesis ha sido posible gracias a la financiación privada y su continuidad dependerá finalmente de ésta.

Parte IV

APÉNDICES

PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE

A.1 INTRODUCCIÓN.

El acero inoxidable es una aleación de hierro con un contenido de cromo superior al 10,5 % y de carbono inferior al 1,5 % [2]. Cumpliendo con estas dos restricciones, que son las que le confieren al acero la cualidad de *inoxidable*, los aceros se agrupan fundamentalmente en cuatro familias metalúrgicas:

- *Austenítico*: aleación de hierro, cromo, níquel y carbono ($[\%C] \leq 0,1$). Amagnético en condiciones de suministro. Ampliamente utilizado en el mundo (65 % de los casos).
- *Ferrítico*: aleación de hierro, cromo y carbono ($[\%C] \leq 0,1$). Magnético.
- *Martensítico*: aleación de hierro, cromo y carbono ($[\%C] > 0,1$).
- *Dúplex*: aleación de hierro, cromo y níquel. Estructura austenoferrítica. Magnético.

El proceso actual de fabricación de los aceros inoxidables¹ se divide en tres etapas claramente diferenciadas:

- *Acería*. Se realizan los procesos de fusión, afino y colado de los distintos tipos de acero.
- *Laminación en caliente*. Los productos de acería se transforman en bobinas mediante procesos de calentamiento y laminación.
- *Laminación en frío*. Procesos de laminación a temperatura ambiente y recocido para la obtención del material final.

A.2 PROCESOS EN ACERÍA.

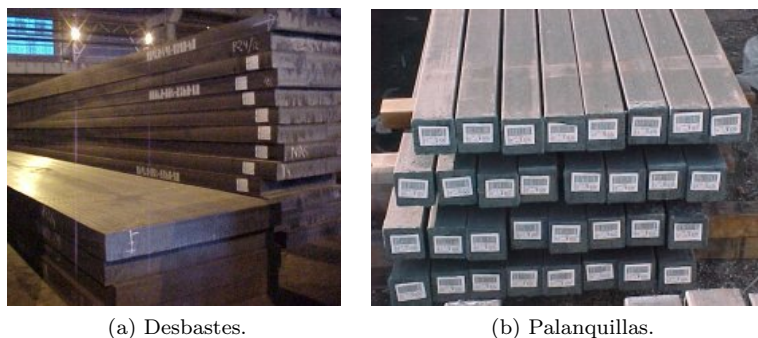
La fabricación en acería de los aceros inoxidables tiene por objeto conseguir la composición química final del acero.

Los productos finales que se obtienen durante el procesamiento del acero en la acería son fundamentalmente los desbastes y las palanquillas (figura A.1).

Los *desbastes* (figura A.1a) son piezas de sección rectangular con longitudes comprendidas entre 5 y 14 metros, con espesores entre 150 y 200 mm y con anchos que varían entre 600 y 1600 mm.

Las *palanquillas* (figura A.1b) son piezas de sección cuadrada de entre 150 y 200 mm de lado y con longitudes normalmente comprendidas entre 1500 y 4000 mm.

¹ La información escrita en el presente anexo ha sido extraída de las siguientes referencias bibliográficas: [398, 399, 25, 400, 401, 402, 403, 14, 404, 4, 10, 405].



(a) Desbastes.

(b) Palanquillas.

Figura A.1: Productos finales de acería.

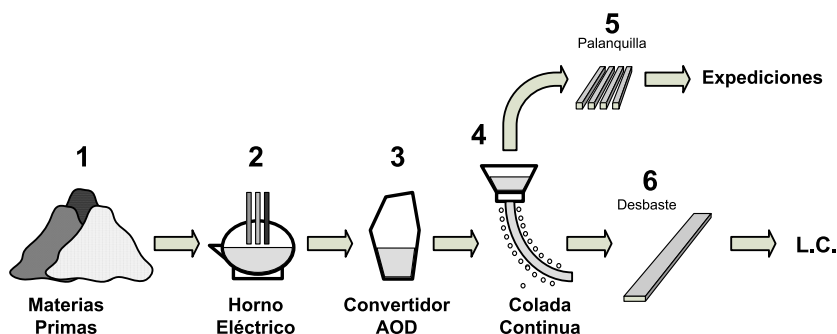


Figura A.2: Esquema general de procesos en acería.

La secuencia de procesos dentro de la acería es la siguiente (A.2):

- Selección de materias primas (1).
- Fusión de los materiales en el horno de arco eléctrico (2).
- Afinado del acero en los convertidores AOD (3).
- Colado del acero (4).

A.2.1 Materias primas.

Las materias primas a emplear durante la fabricación del acero inoxidable dependen principalmente de la composición química final del acero que se desea obtener. La práctica habitual es utilizar *chatarra de acero inoxidable* (figura A.3a) y *aleaciones de materiales* (figura A.3b) que aporten los elementos necesarios para cada tipo de acero.

Cada elemento de aleación se puede obtener partiendo de diferentes materias primas. Así, el cromo se adiciona generalmente en forma de ferro-cromo y silico-cromo, el níquel en forma de ferro-níquel, el molibdeno en forma de ferro-molibdeno, etc.

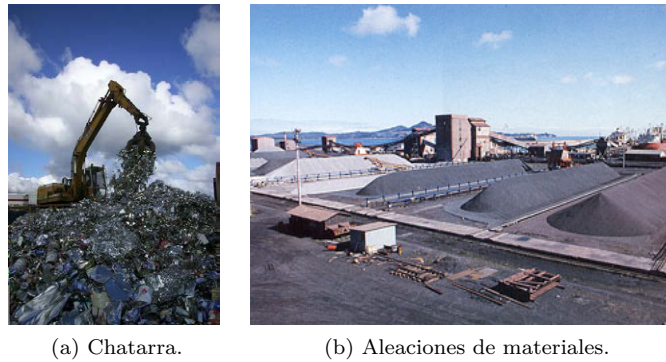


Figura A.3: Materias primas.

La selección de las materias primas requiere un cuidadoso control de los elementos contaminantes que suelen contener. Estos contaminantes deterioran las propiedades del acero pudiendo provocar problemas durante el proceso de fabricación del acero y, posteriormente, durante el uso del producto final por parte del usuario. Los contaminantes más importantes son el fósforo, el azufre y el estaño. Una vez determinadas las cantidades a emplear de cada tipo de material se realiza la carga en una cesta que transportará la selección de materiales hacia el horno de arco eléctrico.

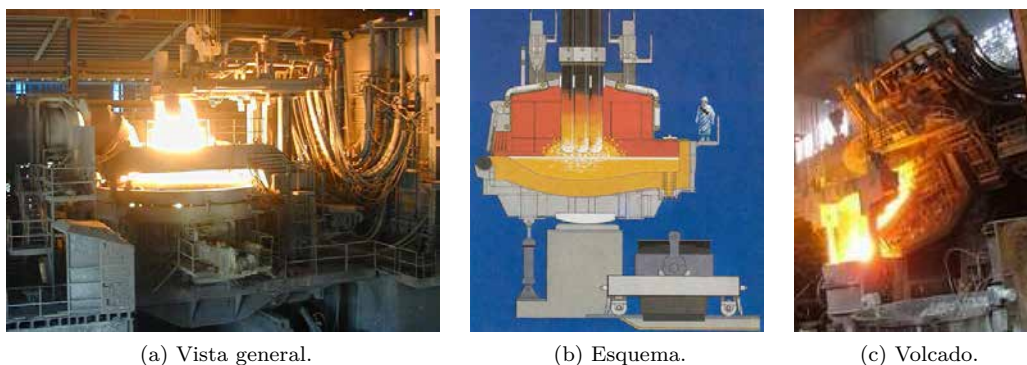
A.2.2 Horno de arco eléctrico.

El horno de arco eléctrico (figura A.4) va a fundir las materias primas cargadas obteniendo un caldo líquido a una temperatura aproximadamente de 1600 °C.

Los hornos de arco eléctrico trifásico suelen tener generalmente una potencia 80 MW que es transferida a la carga mediante tres arcos eléctricos de 100-600 V AC y 20-80 KA por fase. La energía necesaria para fundir una carga de 100 toneladas a una potencia de 80 MW suele ser de aproximadamente 400 MW·h.

El horno de arco eléctrico (figura A.4a y A.4b) está compuesto, desde el punto de vista funcional, de varios tipos de componentes ([406]):

- Elementos estructurales que contienen los materiales cargados (vaso contenedor de forma cilíndrica y tapa superior de forma semiesférica).
- Elementos que posibilitan el movimiento de las principales piezas estructurales del horno (apertura y cierre de la tapa, volcado del caldo sobre cuchara de trasvase, etc.).
- Elementos que soportan el suministro de la energía eléctrica desde el centro de transformación al horno (cableado del secundario del transformador, elementos de sujeción de electrodos y electrodos de grafito).
- Equipos auxiliares del proceso que residen en el horno y en su periferia (grúas, paneles de refrigeración del horno, sistemas de extracción de gases, etc.).



(a) Vista general.

(b) Esquema.

(c) Volcado.

Figura A.4: Horno de arco eléctrico.

Una vez fundido todo el material cargado en el horno se realiza un desescoriado previo del caldo antes de ser volcado (figura A.4c) sobre una cuchara de trasvase que lo llevará desde el horno eléctrico hasta el convertidor AOD (figura A.5a), dónde se le realizará el siguiente proceso de producción: el afinado del acero.

A.2.3 *Afinado del acero.*

En el convertidor AOD (*Argon-Oxygen Decarburization*) se van a realizar los procesos de descarbonación y afino de los distintos elementos con el fin de conseguir la composición química final deseada del acero (figura A.5). Las etapas principales son las siguientes:

- Descarbonación.
- Reducción.
- Desescoriado.
- Desulfuración.
- Afino.

La *descarbonación* consiste en la eliminación del carbono existente en el caldo fundido mediante la reacción de combustión del carbono con el oxígeno. Este proceso se divide en varias fases que se corresponden con sopladors a distintos ratios (relación del caudal total de oxígeno con el caudal total de gas inerte). Cada ratio se alcanzará mediante la relación de caudales de aire, oxígeno y gas inerte. Los valores de los ratios serán progresivos de mayor a menor ratio lo que significa que la eliminación de carbono será mayor en las primeras fases de soplado y menor en las finales.

El control del contenido de carbono durante la descarbonación se llevará a cabo mediante la toma de varias muestras. La composición química de las muestras determinará el momento de cambio de fase y la finalización del proceso una vez que se alcanza la concentración de carbono requerida en el acero que se está produciendo.

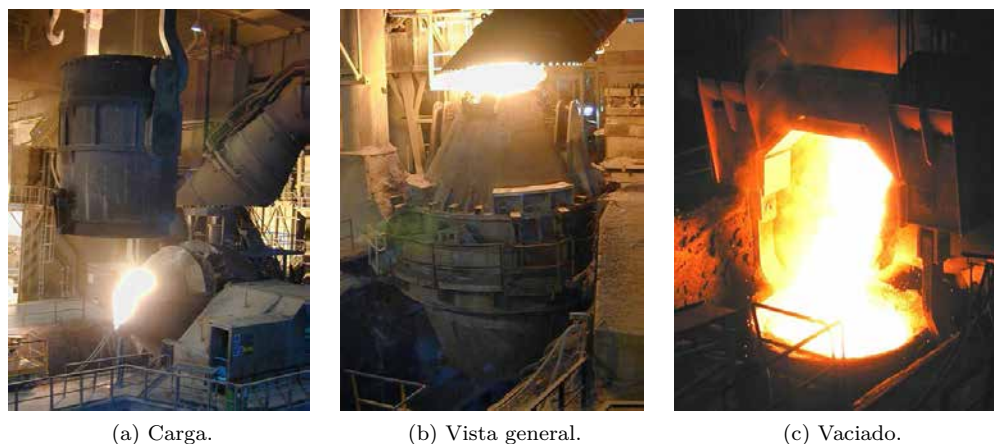


Figura A.5: Convertidor AOD.

Conjuntamente con el carbono, se oxidan otros elementos metálicos que es necesario recuperar por lo que se añade una etapa de recuperación de los mismos denominada *reducción*. Para ello, se calcula la cantidad de oxígeno que ha oxidado estos metales a partir de la composición actual del caldo, el oxígeno soplado y el estequiométricamente necesario para oxidar el carbono dando la cantidad de material a adicionar para realizar la reducción de los metales. Como mezcla reductora se suele utilizar ferro-silicio y cal. El silicio contenido en el ferro-silicio es el elemento que realiza la reducción combinándose con el oxígeno de los óxidos metálicos para formar sílice y liberando el metal que permanece en el caldo.

Con objeto de evitar la reversibilidad de la reacción, la escoria formada durante la reducción se elimina en la etapa de *desescoriado*.

Se requerirá de una etapa de *desulfuración* para eliminar el azufre del caldo y evitar que influya negativamente en las propiedades finales del acero inoxidable. La desulfuración se realizará mediante la adición de una mezcla formada por cal y ferro-silicio. La cal reaccionará con los sulfuros metálicos formando sulfuro de calcio componente que irá directamente a la escoria.

Durante la etapa de *afino* se realizan las adiciones finales necesarias en función de los resultados del último análisis de composición química y sus diferencias con la composición final deseada. Estas adiciones se realizan con materias primas especiales con bajo contenido de carbono, azufre y demás elementos contaminantes.

Finalmente, y una vez verificada la composición química final del acero, se realiza el volcado del mismo sobre una cuchara de trasvase (figura A.5c) donde, previamente a su transporte hacia la colada continua, se realizará un soplado con argón con objeto de homogeneizar la temperatura y optimizar el colado del acero.

A.2.4 Colada continua.

Uno de los avances tecnológicos más importantes en la fabricación del acero inoxidable se debe a la aparición y posterior desarrollo de la colada continua.

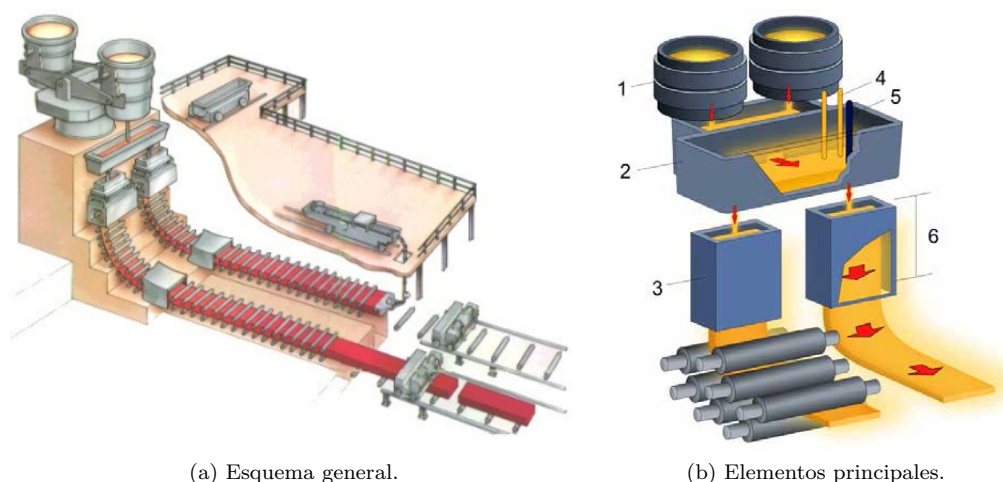


Figura A.6: Colada continua de radio curvo.

En la actualidad, la mayoría de los aceros inoxidables que se producen utilizan la técnica de la colada continua aunque hay ciertos tipos de acero, como pueden ser algunos tipos de acero martensíticos con alto contenido en carbono y algún tipo de austenítico de alta aleación, que no pueden ser colados en continuo debido a su fragilidad.

De los diversos tipos de colada continua existentes (vertical, horizontal y de radio curvo) la más utilizada es la de radio curvo (figura A.6).

El procedimiento de la colada continua (figura A.6b), según la técnica de radio curvo, comienza con la colocación de la cuchara de trasvase, procedente del soplado de argón, sobre una torreta giratoria (1). Una vez colocada la cuchara verticalmente sobre la torreta ésta gira hasta poner la cuchara en la posición de vaciado. A través de una apertura ubicada en la parte inferior de la cuchara se cuela el caldo de acero cayendo en un depósito denominado *tundish* (2). El objetivo de este depósito es doble. Por un lado, almacena el volumen de caldo necesario para que el colado a través de él nunca quede interrumpido mientras se realizan las operaciones de vaciado de las cucharas de trasvase. Por otro lado, dosifica el volumen de caldo que caerá en la lingotera a través de un conducto denominado *buza* (5). Según el producto que se desea obtener la *lingotera* tendrá las dimensiones apropiadas para ello (3 y 6). Para facilitar el colado del caldo a través de la buza el tundish dispone de un movimiento oscilante.

Durante todo este proceso el acero se encuentra aislado del contacto con el aire, bien mediante polvos especiales de cobertura, o bien, mediante la creación de una atmósfera protectora de gas inerte (argón) evitando la oxidación del acero.

La lingotera y los rodillos de salida son refrigerados para permitir la solidificación del acero líquido. En función de las características de cada tipo de acero se requerirá la aplicación de una curva de enfriamiento determinada obligando a controlar las temperaturas de la lingotera y los rodillos de salida.



Figura A.7: Oxicorte.

Finalmente, se encuentra la unidad de oxicorte donde se realiza el corte del acero solidificado según la longitud requerida denominándose desde este momento desbaste (figura A.7).

A la salida, los desbastes tendrán una temperatura entre 800 y 900 °C. En el caso que los desbastes no tengan que ser sometidos a un proceso de tratamiento térmico se dejan enfriar hasta temperatura ambiente.

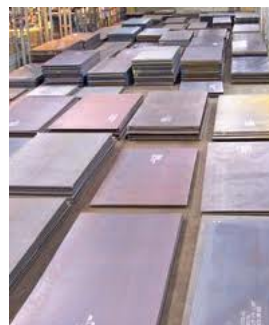
A.3 LAMINACIÓN EN CALIENTE.

La laminación en caliente tiene por objeto transformar los desbastes producidos en acería en bobinas o chapas² de determinadas dimensiones. Estos materiales pueden venderse directamente como producto final, o bien, seguir siendo procesados en laminación en frío. Los productos obtenidos son los siguientes:

- Chapa muy gruesa o plates (figura A.8b). Material rectangular con ancho entre 1000 y 2000 mm, de longitud variable y con espesor comprendido entre 10 y 50 mm, laminado en caliente, recocido en horno no continuo y decapado.
- Bobina o chapa de acabado nº 1 (figura A.8a). Material enrollado o en forma de chapa con espesor comprendido entre 2,5 y 10 mm, ancho entre 900 y 1600 mm y longitud variable, laminado en caliente, recocido en horno y decapado.



(a) Bobinas.



(b) Chapa gruesa.

Figura A.8: Productos de laminación en caliente.

² Coils y plates respectivamente en término anglosajón.

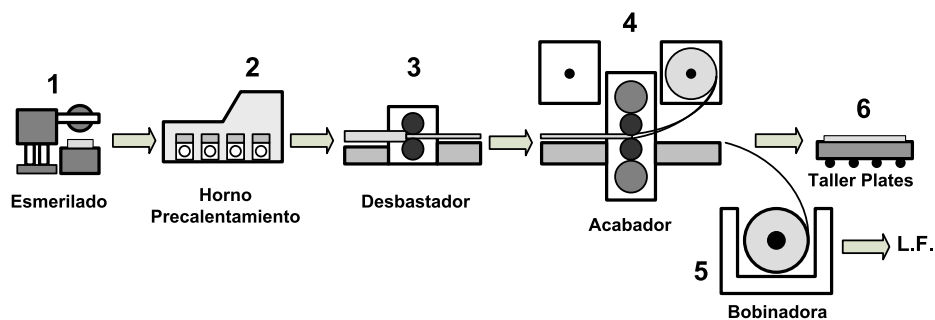


Figura A.9: Esquema general de procesos en laminación en caliente.

Los procesos a los que son sometidos los desbastes provenientes de acería se dividen en tres etapas A.9:

- Esmerilado del desbaste (1).
- Calentamiento del desbaste en el horno (2).
- Laminación en el tren de laminación (3 y 4).

A.3.1 Esmerilado.

Antes de proceder a las operaciones que configuran el proceso de laminación en caliente, los desbastes se someten a un proceso de preparación de esmerilado que consiste en el acondicionamiento de la superficie del desbaste para eliminar la cascarilla (óxido) y todas las marcas o defectos que puedan provocar una degradación de la calidad del material y/o problemas durante el procesamiento del material en el tren de laminación en caliente.

A.3.2 Calentamiento.

Una vez esmerilados los desbastes son introducidos en hornos de calentamiento continuo con objeto de alcanzar la temperatura necesaria para el proceso de laminación que a continuación van a sufrir en el tren (figura A.10). La temperatura a la que son calentados los desbastes oscilará entre los 1250 y 1280 °C.

Existen tres tipos de hornos de calentamiento: de inducción, de empujadores y de viga galopante. Éstos últimos son los más utilizados en la práctica.

Los hornos de viga galopante están compuestos de mecheros de calentamiento distribuidos en la parte superior, inferior y lateral consiguiendo, de esta manera, un calentamiento homogéneo a lo largo de toda la superficie del desbaste. Los hornos de calentamiento constan de tres zonas diferenciadas: zona de precalentamiento (con una temperatura aproximada entre 400 y 500 °C), zona de calentamiento (entre 1250 y 1280 °C) y zona de igualación o mantenimiento.



Figura A.10: Horno de precalentamiento.

La energía calorífica que se transfiere al desbaste se hace fundamentalmente por radiación de las paredes refractarias de alta alúmina y por convección de los gases calientes de la combustión.

Los desbastes son desplazados en el interior del horno por la acción de unas vigas móviles que los levantan y los hacen avanzar hasta que son bajados y apoyados sobre unas vigas fijas. Mediante la repetición de esta secuencia los desbastes recorren los 40 metros de longitud del interior del horno. El tiempo de permanencia en el interior de horno es de un minuto por cada milímetro de espesor del desbaste y es muy importante mantener homogénea la temperatura.

La atmósfera del horno es oxidante y forma una capa de cascarilla durante el calentamiento. Esta capa habrá que quitarla justo antes de realizar la laminación y se realizará en unas rampas de descascarillado en las que se sopla vapor a presión.

A.3.3 Laminación.

Los trenes de laminación en caliente están divididos en dos líneas principales: la línea del desbastador y la línea del acabador.

En el *desbastador* (figura A.11a) se consigue mediante laminación transformar el desbaste en una chapa con un espesor comprendido entre 25 y 30 mm. La temperatura a la salida del proceso de desbastado se sitúa entre 1050 y 1080 °C y dependerá de la potencia del tren y del tipo de acero.

Una vez que la chapa sale de la línea del desbastador entra en la del *acabador*. En esta línea se hace pasar varias veces la chapa a través de una laminador cuya misión es la de reducir el espesor de la chapa en cada pasada hasta conseguir finalmente espesores comprendidos entre 2,5 y 12 mm (figura A.11b).

La velocidad de laminación aumenta conforme disminuye el espesor de la chapa. Ésta irá desde los 1,5 m/s, en la primera pasada, hasta alcanzar los 20 m/s en la última.

Finalmente, la chapa es enfriada mediante agua pulverizada por unos aspersores aumentando su resistencia y facilitando su enrollado en una bobinadora.



(a) Desbastador.



(b) Acabador.

Figura A.11: Laminación en caliente.

A.4 LAMINACIÓN EN FRÍO.

Una vez laminadas en caliente, recocidas y decapadas, las bobinas son deformadas en frío y recocidas para obtener un material con las dimensiones y tipo de acabado final deseado. Los productos obtenidos del proceso de laminación en frío son clasificados por su acabado. La norma internacional ASTM A480/A480M [369] los clasifica en los siguientes tipos:

- Bobinas o chapas en acabado 1.

Laminado en caliente, recocido y decapado. Acabado frecuente en espesores generalmente entre 3 y 10 mm con anchos típicos de 1000, 1200 y 1500 mm.

- Bobinas o chapas en acabado 2D.

Igual que el acabado 1 pero con una pequeña reducción del espesor.

- Bobinas o chapas en acabado 2D (figura A.12a).

Laminado en frío, recocido y decapado. Mucho menos rugoso que el acabado 1 y 1D pero la superficie sigue siendo opaca y mate. Los espesores más usuales varían entre 0,5 y 10 mm con anchos típicos de 1500 mm.

- Bobinas o chapas en acabado 2B (figura A.12b).

Material laminado en frío, recocido y decapado seguido de un ligero pase de laminación en un laminador de cilindros brillantes (skin-pass). Presenta un brillo superior al del acabado 2D y es el más utilizado entre los acabados de la laminación en frío. Como la superficie es más lisa, el pulido resulta más fácil que en los acabados N° 1 y 2D. Espesores típicos entre 0,4 y 5 mm con anchos inferiores a 1500 mm.

- Bobinas o chapas en acabado BA (figura A.12c).

Material laminado en frío, con recocido brillante y ligeramente relaminado. Espesores típicos entre 0,1 y 1,5 mm con anchos típicos inferiores a 1250 mm.

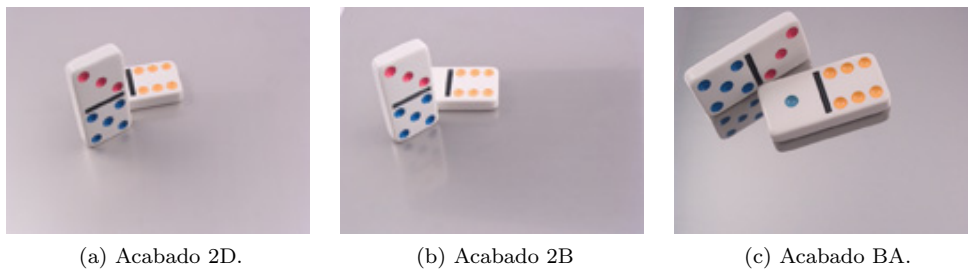


Figura A.12: Acabados de laminación en frío.

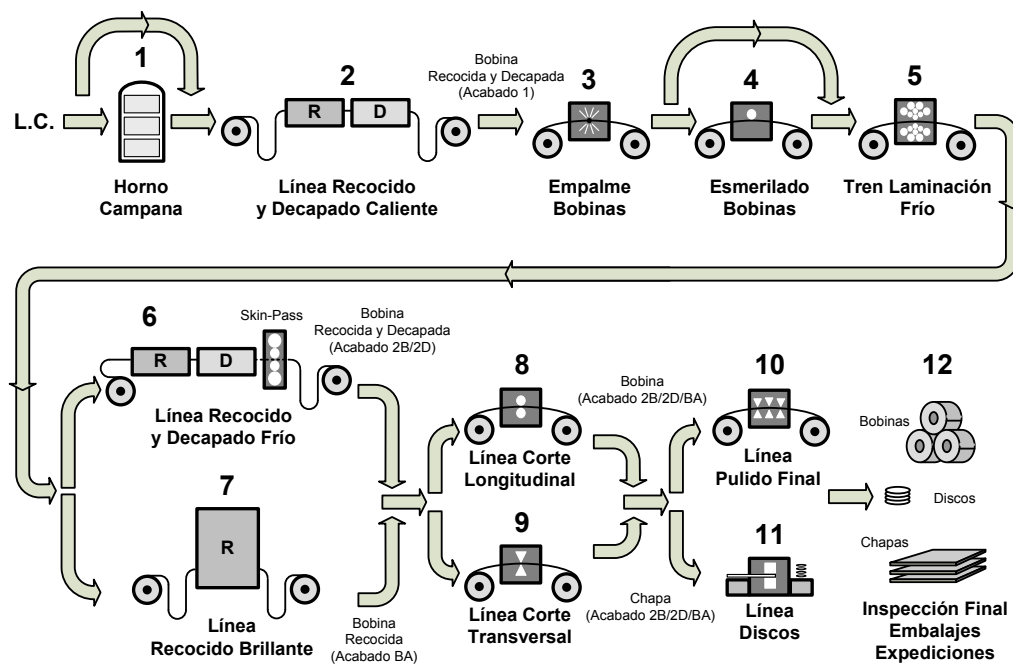
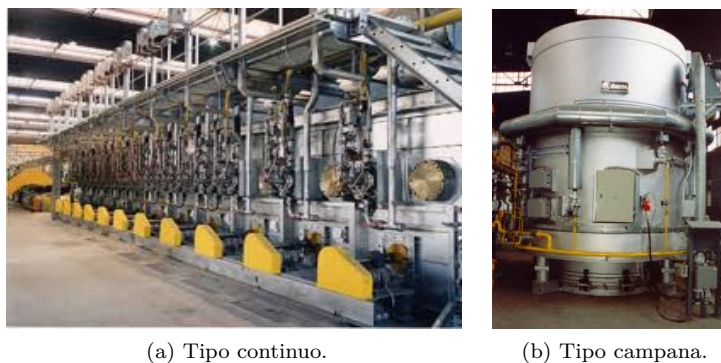


Figura A.13: Esquema general de procesos en laminación en frío.



(a) Tipo continuo.

(b) Tipo campana.

Figura A.14: Hornos de recocido.

En función del acabado y del tipo de producto que se quiere obtener se aplicarán determinados procesos antes, durante y posteriormente al proceso de laminado en frío propiamente dicho. En la figura A.13 se muestra una secuencia genérica de los procesos que intervendrán sobre el material desde que llega de laminación en caliente.

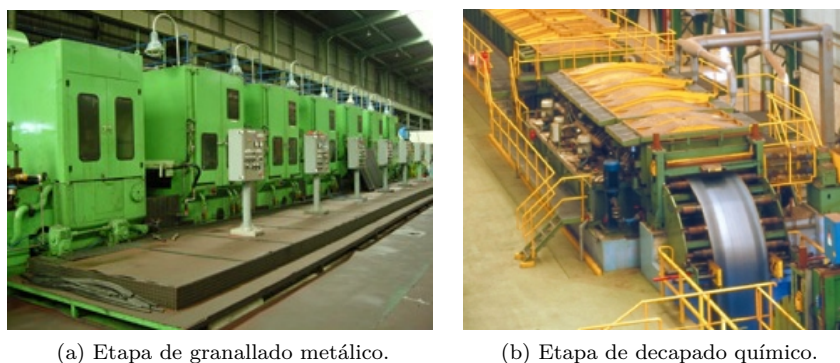
- Recocido y decapado inicial (1 y 2).
- Preparación de bobinas (3 y 4).
- Laminación en frío (5).
- Recocido y decapado final (6).
- Recocido brillante (7).
- Temple superficial.
- Corte y acabado (10, 11 y 12).

A.4.1 *Recocido y decapado inicial.*

La deformación sufrida por el material laminado en caliente provoca la rotura de su estructura cristalina ocasionando la aparición de tensiones internas que dan lugar a una elevada dureza y a una falta de homogeneidad en las propiedades del material.

El tratamiento térmico del acero va a provocar cambios en las condiciones físicas, propiedades mecánicas, niveles de estrés residual y resistencia a la corrosión [400]. De esta manera, mediante el tratamiento térmico de recocido (figura A.14) se regenerará la estructura cristalina y se disolverán los carburos (fundamentalmente de cromo) formados durante el enfriamiento lento de la chapa tras su laminación.

El recocido aplicado sobre los aceros austeníticos será distinto que para los ferríticos y martensíticos. En el caso del acero *austenítico* se llevará el material a su temperatura de recocido (aproximadamente 1050 °C) permaneciendo en esta temperatura durante un determinado espacio de tiempo.



(a) Etapa de granallado metálico.

(b) Etapa de decapado químico.

Figura A.15: Línea de decapado.

Posteriormente se provocará un enfriamiento lo suficientemente rápido como para conseguir estabilizar la austenita de la estructura y evitar la formación de carburos cuando el acero, durante su enfriamiento, atraviesa el rango de temperaturas óptimo para la formación de éstos. Esta operación se realiza en un horno de recocido continuo (figura A.14a).

Para los *ferríticos* y *martensíticos* las condiciones de recocido serán distintas a las de los austeníticos. Estas condiciones son elevar la temperatura hasta la de recocido (800 °C aproximadamente) manteniendo el acero a esta temperatura durante un tiempo bastante prolongado (unas 16 horas). Al contrario que el caso de los austeníticos el enfriamiento ha de ser lento para evitar la formación de carburos (perjudiciales para procesos de transformación posteriores) y para adecuar las propiedades del material. El tipo de horno en el que se realiza este proceso se denomina horno campana (figura A.14b).

Tanto en el proceso de laminación en caliente como en el de recocido se ha generado cascarilla sobre la superficie del acero siendo necesario eliminarla previamente antes de comenzar otros procesos de transformación. Este proceso de eliminación de cascarilla se denomina decapado. Existen varias normativas y especificaciones a nivel mundial sobre el procedimiento base a llevar a cabo para la realización del decapado entre las que cabe destacar la norma ASTM A-380 [407].

El decapado de los aceros austeníticos, ferríticos y martensíticos se realiza en una línea de proceso continuo. En esta línea, la bobina recocida pasa primeramente por una etapa de *granallado metálico* (figura A.15a) que consigue resquebrajar la capa de cascarilla formada. Seguidamente comienza la etapa de *decapado químico* (figura A.15b) en la que, primeramente, se hace pasar la bobina por un tanque que contiene una disolución al 5 % de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a una temperatura comprendida entre 30 y 40 °C. Mediante ataque químico esta disolución hace que la cascarilla pierda su fuerte adhesión al acero. Una vez que se alcanza el tiempo de permanencia de la bobina en la disolución se realiza un enjuague con agua.

Si el tipo de acero es de difícil decapado, previamente al siguiente paso, se le dará un baño electrolítico con una disolución al 5 % de ácido nítrico (HNO_3) a una temperatura de entre 50 y 60 °C. Al terminar se realiza un enjuague con agua.

Finalmente, se hace pasar la bobina por un tanque en el que hay una disolución al 3 % de ácido fluorhídrico (HF) y 10 % de ácido nítrico a una temperatura de 60 °C. Mediante este baño se realiza el decapado y el pasivado del acero. El ácido fluorhídrico eliminará la cascarilla y el ácido nítrico provocará la oxidación del cromo generando la capa pasiva. El proceso de decapado termina con un enjuague de la bobina con agua y un secado con aire.

A.4.2 *Preparación de bobinas.*

Antes de realizar la laminación en frío de las bobinas de acero inoxidable es necesario acondicionarlas para obtener el máximo rendimiento posible tanto en peso de producto obtenido como en la calidad superficial.

Por este motivo se realizan dos operaciones previas: la unión de colas de servicio y el esmerilado superficial de las bobinas.

La unión de colas de servicio, al principio y al final de las bobinas que se van a laminar en frío, tiene por objeto conseguir que la longitud efectiva laminada sea lo mayor posible. En el proceso de laminación normal existe una cierta longitud al principio y al final de la bobina que no se lamina al permanecer en contacto con las bobinadoras. Soldando las colas de servicio se consigue que éstas sean las que permanezcan en las bobinadoras pudiendo, por tanto, laminarse la totalidad de la longitud de las bobinas.

Las bobinas que se van a utilizar para el proceso de laminación en frío deben estar exentas de cualquier marca o defecto que pueda provocar la degradación de la calidad de la bobina. En el caso de alguna de estas bobinas tuviera este tipo de problema es necesario realizar un tratamiento previo de eliminación por esmerilado. Esta operación se realiza en una línea de esmerilado continuo provista de varios cabezales de cintas abrasivas giratorias.

A.4.3 *Laminación.*

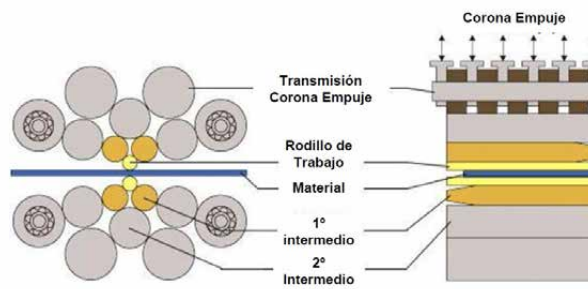
Actualmente, el proceso de laminación en frío del acero inoxidable se realiza en trenes de laminación de tipo *sendzimir* (figura A.16a). Este tipo de tren de laminación está formado por un conjunto de veinte cilindros posicionados en forma de racimo dentro de un bloque de fundición especial (figura A.16b). Al ser el bloque de una única pieza se consigue eliminar cualquier defecto debido a la flexión de los cilindros.

Los cilindros que se encuentran en contacto con la superficie de la chapa que se lamina se denominan cilindros de trabajo y son cilindros de acero tipo FZ3 templados por inducción y con dureza HRC 61 hasta el propio núcleo interno del cilindro. En ciertos procesos especiales se usan cilindros de acero tipo FZ7 aleados con wolframio y con dureza HRC 64. El diámetro típico de los cilindros de trabajo es de 60 mm.

Tanto los cilindros de trabajo como los primeros intermedios que le sirven de apoyo no están acoplados a ningún sistema de tracción girando por el efecto del rozamiento con la siguiente línea de cilindros, segundos intermedios, que sí son cilindros motores del tren. Finalmente, existen dos líneas de cuatro cilindros, una superior y otra inferior, que realizan la función de ejes de apoyo. Los dos cilindros centrales, por medio de cremalleras, provocan el cierre del conjunto hacia la banda consiguiendo, de esta manera, la presión de laminación requerida para la laminación.



(a) Vista general.



(b) Esquema interno.

Figura A.16: Tren de laminación sendzimir.

Las bobinadoras de entrada y salida del tren trabajan con una tensión típica de 40 toneladas, motivo por el cual, al efecto de laminado bajo presión de los cilindros se suma cierto efecto de estirado por tracción.

Las reducciones de espesor que se pueden conseguir en un tren sendzimir se encuentran limitadas por las características del material que se procesa. Si el material va a ser recocido posteriormente se necesita una cierta reducción mínima que aporte la energía interna necesaria para que el proceso de recocido sea industrialmente rentable. Si esta reducción mínima no se alcanza, la recristalización posterior del material será posible a base de aportar la energía interna necesaria aumentando la temperatura o aumentando el tiempo de permanencia del acero a la temperatura de recocido. Por este motivo, se fijan como reducciones mínimas un 30 % para los aceros austeníticos y un 40 % para los ferríticos y martensíticos.

La reducción máxima a la que puede ser sometido el acero viene fundamentalmente limitada por la forma de la banda laminada. Una excesiva reducción hace que la banda tenga defectos de forma y planicidad lo que provocará problemas en líneas de procesado posterior. La máxima reducción aplicable en la práctica es de entre un 70 y 75 % en función del ancho de la chapa de acero.

A.4.4 *Recocido y decapado final.*

El material fuertemente deformado tras el proceso de laminación en frío no posee su estructura cristalina ordenada por agrupaciones de granos ya que éstos se encuentran rotos y la estructura está formada por bandas orientadas en el sentido de la deformación.

Esta estructura implica la aparición de tensiones internas y de propiedades mecánicas no adecuadas para la gran mayoría de aplicaciones por lo que, con el objeto de regenerar la estructura y conseguir la aparición y crecimiento de los granos, se realiza el tratamiento térmico de recocido.

A diferencia del recocido de la bobina laminada en caliente, no existen diferencias de proceso en el recocido de los distintos tipos de acero: austeníticos, ferríticos y martensíticos. Así, el recocido de todo el material laminado en frío se realiza en hornos de proceso continuo.

El recocido es subcrítico, siendo la temperatura de tratamiento de 1050 °C para los tipos austeníticos y de 800 °C para los ferríticos y martensíticos. El enfriamiento se realiza con agua con el fin de atravesar la zona de temperaturas de máxima aparición de carburos lo más rápidamente posible.

Seguido del proceso de recocido se realiza el proceso de decapado con objeto de eliminar la cascarilla formada sobre la superficie del acero en el horno de recocido. Al introducir la superficie oxidada en el seno de una solución acuosa de un ácido inorgánico, éste penetra en las grietas y poros de la costra de cascarilla.

Primeramente se realizará la inmersión del acero en una disolución de sales fundidas de hidróxido sódico, nitrato sódico y cloruro sódico a una temperatura de 480 °C. Las sales provocarán una oxidación de la cascarilla al mismo tiempo que la hacen más porosa preparando la superficie para el ataque químico posterior. El uso del baño de sales en vez del proceso de granallado viene impuesto por la diferente composición y estructura de la cascarilla formada en el proceso de frío y la formada en el proceso de caliente. Previamente a la inmersión en la disolución ácida se procede al enjuague con vapor de agua recalentado de la superficie del acero.

A continuación se hace pasar la banda de acero a través de un tanque con una disolución ácida compuesta de un 5 % de ácido sulfúrico a una temperatura de entre 30 y 40 °C. La cascarilla perderá adhesión a la superficie del acero. Se procede a realizar un nuevo enjuague con agua. Si el acero es difícil de decapar habrá que realizar un baño electrolítico por inmersión de la banda de acero en tanque con disolución al 5 % de ácido nítrico a una temperatura de entre 50 y 60 °C.

Tras un nuevo enjuague con agua, se realiza el baño de decapado y pasivado por inmersión del acero en disolución al 3 % de ácido fluorhídrico y 10 % de ácido nítrico a temperatura de 60 °C. El ácido fluorhídrico eliminará la cascarilla mientras que el ácido nítrico creará la capa pasiva por oxidación del cromo. Nuevamente se procede a un enjuague con agua previo al secado de la banda.

El proceso finaliza aquí para los acabados 2D enrollando la banda de acero sobre el mandril de la bobinadora. En el caso de que se quieran obtener acabados tipo 2B, de alta homogeneidad del grano cristalino y gran brillo superficial final, la banda se hará pasar por un laminador especial denominado skin-pass (figura A.17) que le conferirá las características superficiales.



Figura A.17: Laminador skin-pass.

A.4.5 *Recocido brillante.*

El recocido brillante de materiales laminados en frío tiene como característica fundamental la utilización de un horno de recocido especial en el que la atmósfera, con un muy bajo contenido de oxígeno, se encuentra perfectamente controlada frente a la atmósfera oxidante del horno de recocido estándar.

Esta atmósfera de nitrógeno e hidrógeno, formados por la disociación del amoníaco, tiene como principal efecto impedir la oxidación de la banda a la temperatura de recocido impidiendo, por tanto, la formación de cascarilla. Al no formarse cascarilla no es necesario el decapado posterior de la banda con lo que ésta queda con un acabado brillante a diferencia del acabado mate que se obtiene con el recocido estándar.

El proceso de recocido brillante se realiza en una línea continua con un horno de resistencias eléctricas que por radiación sobre la banda se consigue que ésta alcance las temperaturas de recocido. Debido a la gran longitud de calentamiento efectivo necesaria se utilizan normalmente hornos verticales que permiten conseguir grandes zonas de calentamiento en un reducido espacio.

El acabado conseguido con este recocido brillante, conocido como acabado BA, es muy estimado en aquellos usos en los que el acero inoxidable tiene aplicaciones decorativas.

A.4.6 *Temple superficial.*

Una vez el material recocido y decapado (o sometido a recocido brillante) se realiza una operación consistente en provocar un cierto alargamiento del material no superior al 3 %. Esta operación se realiza en un laminador especial.

El objeto del temple superficial es distinto para cada familia de acero y para cada tipo de recocido realizado.

En los aceros austeníticos el temple superficial mejora la planicidad de la banda, da homogeneidad al grano y produce un mejor brillo. Si el recocido ha sido normal, el proceso se realiza en húmedo con una emulsión en contacto con el cilindro y la banda. Si el recocido ha sido brillante, el proceso se realiza en seco con lo que se consigue obtener un mayor brillo.



(a) Corte transversal.



(b) Corte longitudinal.

Figura A.18: Líneas de corte.

En los aceros ferríticos, aparte de los mismos efectos que en los austeníticos, el temple superficial tiene como misión provocar el alargamiento necesario para que el material sobrepase la zona de fluencia del diagrama tensión-deformación del material. Con ello se consigue que cualquier deformación posterior del material responda correctamente a la zona estable de dicho diagrama.

A.4.7 Líneas de corte.

El proceso de fabricación de los aceros inoxidable finaliza con las líneas de corte y acabado. En estas líneas se obtendrá el material en las condiciones de suministro deseadas para cada aplicación. Previamente a las líneas de acabado el material ha de ser cortado, de tal manera, que cumpla con las especificaciones dimensionales requeridas por el cliente.

Las líneas de corte pueden ser líneas de corte *transversal* (figura A.18a) o de corte *longitudinal* (figura A.18b).

En las líneas de corte transversal se obtiene el material en formato *chapa* (figura A.19a) mientras que en las de corte longitudinal, en formato *fleje* (figura A.19b). Mediante el uso de cizallas especiales en las líneas de corte trasnversal se pueden producir chapas de dimensiones distintas a las rectangulares o cuadradas. De este modo pueden obtenerse chapas con formas triangulares, romboidales o trapezoidales. También se pueden obtener productos en forma de *discos* (figura A.19c) de distintas dimensiones haciendo pasar el material por una líneas de discos.

A.4.8 Líneas de acabado.

Mediante el paso de material tipo 1D, 2D, 2B y BA por líneas de pulido final se pueden conseguir otros acabados superficiales diferentes. Estos tipos de acabado corresponden a los definidos dentro de la normativa, por ejemplo la ASTM A480/A480M [369].

- N° 3 (figura A.20a): Material lijado en una dirección. Normalmente el lijado se hace con lijas de granulometría entre 80 y 120 mesh.



Figura A.19: Productos terminados.

- N° 4 (figura A.20b): Material lijado en una dirección con lijas de granulometría de 150 a 400 mesh. Es un acabado con rugosidad menor que la del N° 3.
- N° 6 (figura A.20c): El material con acabado N° 4 se termina con paños embebidos con pastas abrasivas y aceites. El aspecto es opaco, satinado, con reflectividad inferior a la del N° 4. El acabado no es dado en una única dirección y el aspecto varía un poco porque depende del tipo de paño utilizado.
- N° 7 (figura A.20d): Acabado con alto lustre. La superficie es finamente pulida conservando algunas líneas de pulido. Es un material con alto grado de reflectividad y se obtiene con pulidos progresivos cada vez más finos.
- N° 8 (figura A.20e): Acabado espejo. La superficie es pulida con abrasivos cada vez más finos hasta que todas las líneas de pulido hayan desaparecido. Es el acabado más fino que hay y permite que los aceros inoxidable sean usados como espejos. También se utilizan en reflectores.

Existen también otros tipos de acabados superficiales como son los *acabados estampados* (figura A.21a) denominados también tipo *emboss* que se obtienen laminando las bobinas con rodillos previamente grabados con dibujos. Este proceso endurece la chapa y permite lograr espesores más finos reduciendo el peso del material. Son chapas ideales como revestimientos de grandes superficies planas.

El acero inoxidable también puede ser *coloreado* (figura A.21b) una vez que se le ha dado a su superficie suficiente perfil para el agarre de la pintura y una escrupulosa limpieza. Las técnicas utilizadas para la fijación de la capa de pintura están basadas en la electrólisis siendo el acero austenítico el más apropiado para ello. Este tipo de acabado suele utilizarse en aplicaciones decorativas.

Mediante técnicas como el ataque con ácido (figura A.21c), moleado, pulidos especiales (figura A.21d), chorreo con partícula de arena, cerámicas y metálicas, se pueden llegar a crear infinidad de combinaciones con una gran diversidad de aplicaciones decorativas y artísticas. Todas estas técnicas vienen desarrolladas en [400].

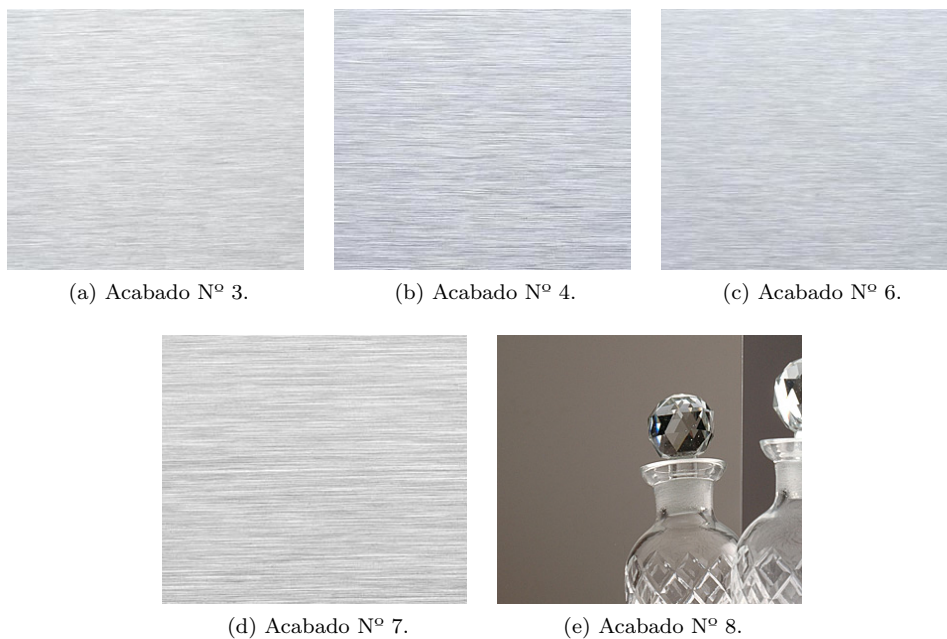


Figura A.20: Acabados superficiales especiales.

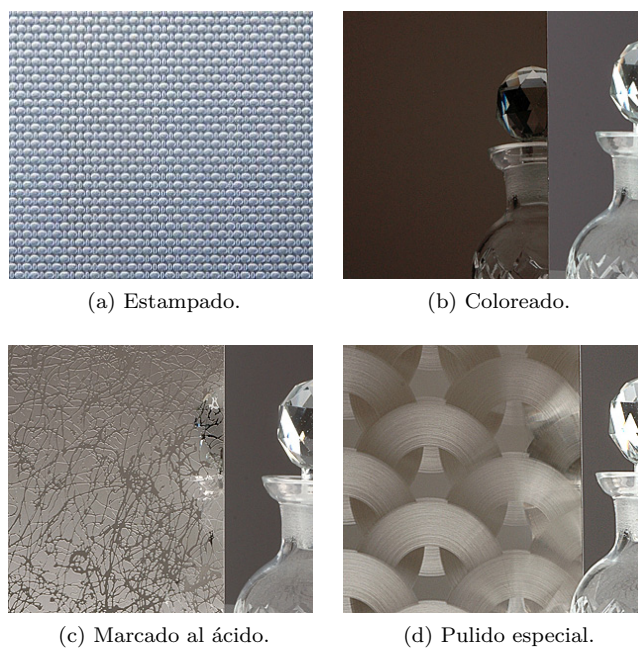


Figura A.21: Acabados decorativos.

A.4.9 *Inspección final y embalado.*

Los productos terminados pasan por una *inspección final* y, seguidamente, se embalan en una serie de líneas especiales de acuerdo con el tipo de producto y sus dimensiones. Finalmente, se llevan al área de expediciones de productos.

A.4.10 *Otros productos finales.*

Mediante el moldeo de productos planos en máquinas especiales de moldeo de rodillos de múltiples fases y la aplicación de soldadura inerte se obtienen *tubos de acero inoxidable* de distintas dimensiones (figura A.22a).

A partir del producto final de acería denominado *palanquilla* se pueden aplicar una serie de procesos de conformado para convertirlo, mediante la laminación en caliente, en *barras* que pueden ir de 5 mm de diámetro mínimo, hasta un máximo de 30 mm (figura A.22b). La palanquilla, de sección cuadrada, será convertida en una barra, sección circular, mediante laminaciones consecutivas alternando formatos ovalo-redondo. Al igual que en la laminación en caliente de los desbastes habrá dos laminadores especiales: caja de laminación desbastadora y acabadora.

Aplicando técnicas de trefilado sobre la barra de acero se obtendrán distintos tipos de *alambre* (figura A.22c) pudiendo ser convertidos, posteriormente, en *cables* mediante el trenzado de los mismos (figura A.22d).

Otra producto que se puede obtener partiendo de la palanquilla son los *perfiles* tipo U, T, I, doble T, etc. (figura A.22e). El conformado se realizará mediante trenes estructurales de laminación en caliente.

A.5 APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

El acero inoxidable es una aleación con un rango de aplicaciones [408] que van desde la más simple lavadora hasta el más complejo tanque reactor de una industria química. La gran resistencia del acero inoxidable a la corrosión, poco mantenimiento y su relativo bajo coste hacen de él un material base ideal para muchas aplicaciones. Además, el ser un material fácilmente reciclable, reutilizable y de larga vida lo caracteriza como un material muy sostenible.

La figura A.23 muestra una representación gráfica de los principales sectores de aplicación del acero inoxidable [7].



Figura A.22: Otros productos.

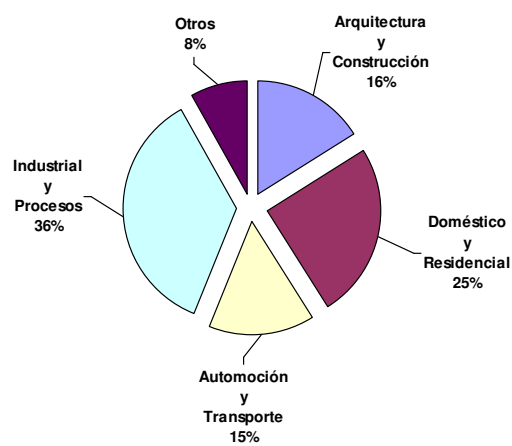


Figura A.23: Principales sectores de aplicación del acero inoxidable.



(a) Edificio Chrysler, N.Y. (b) Puente peatonal.

Figura A.24: Aplicaciones: arquitectura y construcción (2005).

A.5.1 *Arquitectura y construcción.*

El acero inoxidable se emplea a menudo como material arquitectónico [409]. La mezcla de conceptos como la apariencia estética, la excelente resistencia a la corrosión atmosférica y los bajos costes de mantenimiento hacen del acero un material apropiado e interesante para la arquitectura y construcción (figura A.24).

El acero, el cobre, el aluminio, el plomo, el bronce y otras aleaciones reaccionan con el ambiente siendo degradadas con el paso del tiempo como así lo son también la madera, el plástico, la pintura e incluso el cristal.

Con el acero inoxidable se elige un material con una protección superior frente a las condiciones ambientales que impide su degradación.

Usado en la arquitectura y construcción en recubrimientos de suelos, paredes y fachadas, barandillas, vidrieras, escaleras, paradas de autobuses, estaciones de tren y metro, cabinas telefónicas, cubiertas, puentes peatonales, etc.

Las estructuras de acero inoxidable pueden construirse en obra mediante uniones soldadas, uniones atornilladas y otros métodos especiales de fijación mecánica.

A.5.2 *Automoción y transporte.*

El acero inoxidable es empleado fundamentalmente en sistemas de escape de gases de vehículos de automoción ya que es un material que auna gran resistencia a la corrosión frente a elevadas temperaturas de los gases de escape (figura A.25a). De hecho, es el único material que puede trabajar a altas temperaturas conjuntamente con un convertidor catalítico de reducción de gases contaminantes (NO_x y CO).

Aunque los sistemas de escape de gases de motores se llevan la mayor parte del mercado del acero inoxidable en la automoción hay otras aplicaciones de gran importancia que no pueden ignorarse. Entre ellas caben destacar: la fabricación de válvulas y juntas, conducciones y sus elementos de fijación, cinturones, componentes de air bags, filtros, carrocerías, células de combustible, etc.



Figura A.25: Aplicaciones: automoción y transporte.

Con una excepcional relación de las características resistencia-peso y absorción de energía-peso el diseño de automóviles se ve favorecido por una reducción del peso mientras se mantienen las características frente a colisiones.

Respecto al transporte de mercancías destacar el uso del acero inoxidable en tanques de almacenamiento de alimentos, gases licuados, combustibles, sustancias químicas corrosivas, etc. (figura A.25b) siempre considerando las características que hacen interesante su uso: alta resistencia, sin costes adicionales de recubrimientos internos y externos, larga vida y bajos costes de mantenimiento.

Respecto al transporte marítimo, el uso más frecuente del acero inoxidable es en la construcción de tanques de almacenamiento de alimentos, compuestos químicos y gases licuados de barcos siendo la resistencia a la corrosión y resistencia mecánica las características más importantes que hacen ideal su uso en estas aplicaciones.

Destacar también el empleo del acero inoxidable en la fabricación de vagones de ferrocarril (figura A.25c) por su resistencia a la corrosión y su excelente relación resistencia mecánica-peso.

A.5.3 Residencial y comercial.

El acero inoxidable es el material esencial para productos relacionados con la cocina, salud, lavanderías y climatización debido a que combina resistencia y durabilidad con una excepcional facilidad para ser limpiado, desinfectado y esterilizado.

En la cocina se trata de un material tremendamente estético, fácil de limpiar, higiénico (las bacterias tienen dificultad para adherirse a su superficie) y neutro (no transmite sabor alguno y no reacciona químicamente con los alimentos). Otras características que lo hacen atractivo para la cocina son la gran resistencia al impacto, a la abrasión, erosión, desgaste y altas temperaturas.

Tanto en el ámbito doméstico como en el comercial se emplea en la fabricación de lavadoras (figura A.26a), neveras, lavaplatos, secadoras, sartenes, fregaderos (figura A.26b), cuberterías (figura A.26c), freidoras, baterías de cocinas (figura A.26d), microondas, campanas extractoras, muebles, lámparas, calentadores de agua, aparatos de climatización, extracción y ventilación, carcasas de teléfonos celulares, placas solares térmicas, etc.



Figura A.26: Aplicaciones: residencial y comercial.

En el ámbito de la salud, destacar su empleo en todo tipo de instrumentación quirúrgica (figura A.26e), agujas hipodérmicas, implantes, sondas, envases criogénicos, etc. debido, sobre todo, a su facilidad de limpieza y esterilización entre otras características no menos importantes.

A.5.4 Industrial y procesos.

Por sus características de gran resistencia a la corrosión, a las altas temperaturas y resistencia mecánica, el acero inoxidable es un material muy apropiado en aplicaciones industriales y de procesos.

Se usa habitualmente en la construcción de elementos usados en plantas de biogás, plantas desalinizadoras, plantas de tratamiento de aguas (figura A.27a), industria papelera, industria azucarera, plataformas petrolíferas (figura A.27b) y refinerías, gaseoductos y oleoductos, cámaras de presión, álabes de turbinas de vapor (figura A.27c), cadenas portacables, centrales solares fotovoltaicas y térmicas (figura A.27d), etc.



(a) Tratamiento de aguas.



(b) Plataformas.



(c) Turbinas de vapor.



(d) Centrales solares.

Figura A.27: Aplicaciones: industrial y procesos.

PROPAGACIÓN DE LA LUZ A TRAVÉS DE LOS MATERIALES

B.1 INTRODUCCIÓN.

En este apéndice se exponen una serie de ideas básicas sobre ciertos aspectos de la propagación de la luz a través de los materiales que sirven de apoyo para ciertas partes de la presente tesis. En concreto, se da una clasificación de los materiales atendiendo al efecto producido por un haz luminoso cuando incide sobre un material. Se definen una serie de magnitudes que permiten cuantificar la luz desde el punto de vista radiométrico y fotométrico. A continuación se explica las características de la reflexión de la luz sobre superficies haciendo una serie de consideraciones respecto a la textura y rugosidad de superficies terminando con la definición de la función de reflectancia bidireccional. Se describirá las bases fundamentales de los modelos de reflexión de superficies. Finalmente, se tratará el caso particular de la propagación de la luz a través de los metales.

Toda la información expuesta en este anexo ha sido extraída de diferentes libros y documentos [178, 378, 410, 29, 411, 412, 388].

B.2 LA LUZ.

La luz es una radiación electromagnética que, dependiendo de cómo se observe, se manifiesta según dos estados complementarios: como onda y como partícula.

Según la *teoría ondulatoria*, la luz es considerada una onda electromagnética que se propaga por el espacio y que consiste en un campo eléctrico \vec{E} variable con el tiempo generando un campo magnético \vec{B} (ley de Ampère) y, viceversa, un campo magnético variable en el tiempo que genera un campo eléctrico (ley de Faraday). Los campos eléctricos y magnéticos generados son perpendiculares entre sí y perpendiculares, ambos, a la dirección de propagación de la onda.

Según la teoría corpuscular, la luz es considerada un flujo de partícula sin carga y sin masa denominadas fotones. Estas partículas tienen la característica de portar radiaciones electromagnéticas.

La descripción exacta y rigurosa de la luz, así como, su comportamiento requieren de un conocimiento profundo de las ecuaciones de campo electromagnético de Maxwell, de la electrodinámica cuántica (QED) y de la mecánica cuántica.

La luz considerada *visible* es tan solo una pequeña fracción del espectro electromagnético que se extiende desde las ondas de muy baja frecuencia pasando por las microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta hasta los rayos-x y rayos gamma.

B.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Idealmente, cuando un haz luminoso incide sobre un objeto o material pueden ocurrir tres cosas: que todo el haz se refleje (efecto espejo), que todo el haz sea absorbido (cuerpo oscuro) o que se transmita (atraviase completamente el material u objeto, por ejemplo un cristal) [178].

B.3.1 *Propiedades reflexivas.*

Cuando la luz es reflejada por una superficie un porcentaje de dicha luz se pierde debido al fenómeno de absorción. La relación entre el haz reflejado y el haz incidente se denomina *reflectancia* de la superficie.

Cualquier superficie que no es completamente negra puede reflejar luz. La cantidad de luz que refleja y la forma en que dicha luz es reflejada se determina por las propiedades de reflexión de la superficie.

Según cómo se refleje el haz luminoso los materiales pueden ser:

- Especulares (figura B.1a). El ángulo de incidencia del haz luminoso θ_i es igual al ángulo de reflejado θ_r .
- Reflexivos compuestos (figura B.1b). El haz luminoso se refleja sobre la superficie abriéndose en una serie de componentes con forma de abanico simétrico en las que el ángulo de reflexión θ_r de la componente reflejada de mayor valor coincide con el ángulo de incidencia θ_i . Este tipo de reflexión ocurre cuando la superficie es irregular o rugosa.
- Difusos (figura B.1c). El haz luminoso que incide sobre la superficie es reflejado en todas direcciones. Este tipo de reflexión se produce en materiales tales como el papel blanco mate, la nieve, superficies de yeso, etc.
- Reflexivos mixtos (figura B.1d). Materiales con una reflexión intermedia entre la especular y la difusa en la que parte del haz incidente se refleja y parte se difunde. Este tipo de reflexión la presentan los metales no pulidos, el papel brillante, superficies barnizadas, etc.
- Reflectores (figura B.1e). El haz luminoso se refleja en la misma dirección de incidencia pero en sentido contrario.
- Selectivos al espectro. Parte del haz luminoso es reflejado, de manera especular o difusa, y parte absorbido dependiendo de las longitudes de onda de los distintos rayos que componen el haz.
- No selectivos al espectro. Todas las longitudes de onda de los rayos que componen el haz son reflejadas.

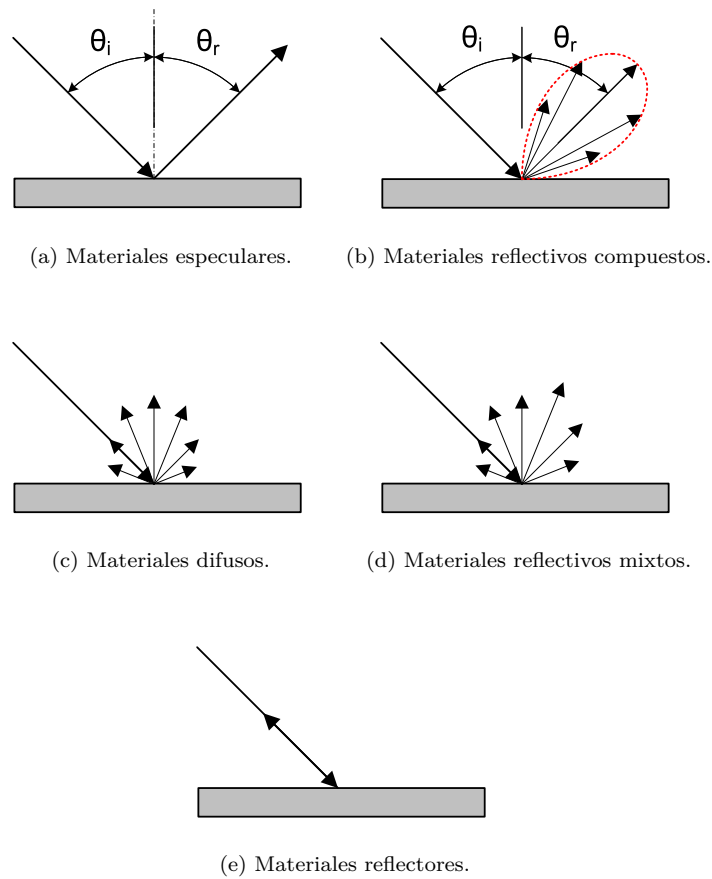


Figura B.1: Propiedades reflexivas.

B.3.2 Propiedades absorbentes.

Se denomina absorción a la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente en forma de calor. Ésta es una característica de todas las superficies que no son completamente reflectoras y de los materiales que no son completamente transparentes. La relación entre la luz absorbida y la luz incidente se denomina *absortancia* del material.

Desde el punto de vista de la absorción del haz luminoso por parte de la superficie se tienen materiales selectivos o no selectivos al espectro. Por ejemplo, un material que absorba todas las longitudes de onda que componen el haz luminoso será de color negro y, al revés, un material que no absorba ninguna será de color blanco. Entre ambos colores se tendrán el resto en función de su selectividad de longitudes de onda.

B.3.3 Propiedades transmitivas.

Se denomina transmisión al paso de un haz, compuesto de distintas ondas electromagnéticas, a través de un medio sin que haya cambio en frecuencia individual de las ondas que componen el haz.

Este fenómeno es típico de ciertos tipos de vidrios, cristales, plásticos, ciertos tipos de líquidos como el agua y el aire. Al atravesar el material parte de la luz se pierde debido a la reflexión en la superficie del medio siguiente y parte se absorbe. La relación entre la luz transmitida y la luz incidente se denomina *transmitancia* del material.

Considerando materiales que dejan pasar el haz luminoso se tendrán:

- Transparentes (figura B.2a). El haz luminoso pasa sin ser absorbido o reflejado con una pequeña pérdida en la intensidad. Estos materiales permiten ver con nitidez objetos colocados tras ellos.
- Traslúcidos (figura B.2b). La mayor parte del haz luminoso atraviesa el material de forma difusa. Los materiales de este tipo más conocidos son los cristales esmerilados y los vidrios orgánicos opalizados. Los objetos colocados tras ellos no se distinguen.
- Transmisivos mixtos (figura B.2c). Son el resultado de una transmisión intermedia entre el material transparente y el traslúcido. Se presenta en vidrios orgánicos, vidrios orgánicos depulidos y cristales de superficie labrada. Los objetos tras estos materiales no se pueden observar aunque sí determinar su posición.
- Selectivos al espectro. En función de la longitud de onda de las componentes que componen el haz algunas de ellas serán transmitidas y otras no (Los filtros ópticos están fabricados de materiales de este tipo).

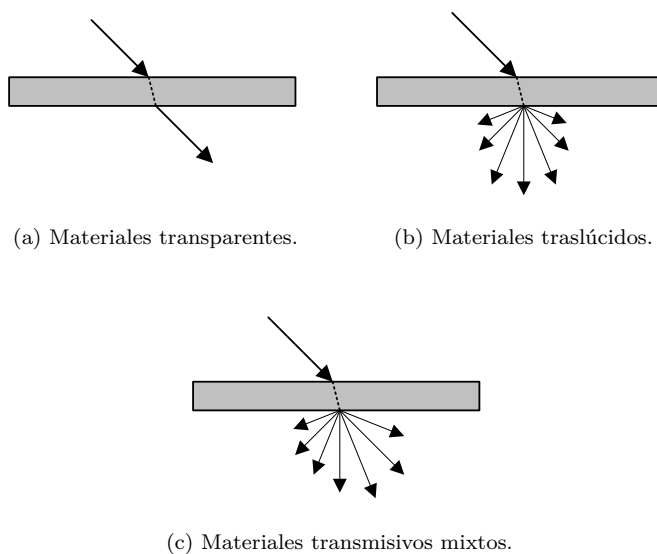


Figura B.2: Propiedades transmitivas.

B.4 RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.

La medida de la luz en un rango determinado del espectro electromagnético es un campo conocido como radiometría. Dentro de la radiometría se han definido una serie de unidades que describen la forma en que la energía es transferida desde la fuente luminosa a la superficie del material y qué es lo que ocurre con esta energía cuando incide sobre la superficie de un objeto material.

Cuando esta transferencia de energía de la fuente luminosa a la superficie u objeto se normaliza a la respuesta espectral del ojo de un observador humano se denomina *fotometría*. El sistema visual humano percibe radiaciones electromagnéticas dentro del rango de longitudes de onda que van desde los 380 a los 770 nm. La sensibilidad del ojo humano no es lineal ya que varía con la longitud de onda y con la cantidad de flujo radiante. Por este motivo, cuando se realizan medidas fotométricas no se miden los vatios del flujo radiante sino que se intenta medir la impresión subjetiva producida por ese flujo radiante en el sistema visual humano.

La relación entre la *luminosidad* de la escena y la *luminosidad* de la imagen generada por la cámara es uno de los parámetros fundamentales en la formación y/o registro de la imagen en los sistemas de visión por computador.

Los dispositivos ópticos y, en particular, las cámaras se han diseñado para operar en la región visible del espectro. Éste es el motivo por el cual las magnitudes usadas para expresar la respuesta de las cámaras son las fotométricas. La tabla B.1 muestra las franjas espectrales para el rango óptico definidas por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE).

FRANJA ESPECTRAL	λ (nm)
UV-C (ultravioleta)	[100, 280]
UV-B (ultravioleta)	[280, 315]
UV-A (ultravioleta)	[315, 400]
VIS (visible)	[~380, ~780]
IR-A (infrarrojo cercano, NIR)	[780, 1400]
IR-B (infrarrojo)	[1400, 3000]
IR-C (infrarrojo lejano, FIR)	[3000, 1000000]

Tabla B.1: Franjas espectrales.

Las magnitudes radiométricas y fotométricas suelen diferenciarse utilizando los subíndices *e* (energía) para las radiométricas y *v* (visual) para las fotométricas. La tabla B.2 muestra la relación entre magnitudes radiométricas y fotométricas (extraída de [410]).

MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS			MAGNITUDES FOTOMÉTRICAS		
Magnitud	Símbolo (unidad)	Definición	Magnitud	Símbolo (unidad)	Definición
Energía radiante	Q_e (J)	-	Energía luminosa	Q_v (lm·s)	-
Densidad de energía radiante	W_e (J/m ³)	$W_e = \frac{dQ_e}{d\tau}$	Densidad de energía luminosa	W_v (lm·s/m ³)	$W_v = \frac{dQ_v}{d\tau}$
Flujo o potencia radiante	Φ_e (W)	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Flujo luminoso	Φ_v (lm)	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$
Exitancia radiante (emitancia)	M_e (W/m ²)	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	Exitancia luminosa	M_v (lx)	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$
Incidencia radiante (irradiancia)	E_e (W/m ²)	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	Iluminancia	E_v (lx)	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$
Intensidad radiante	I_e (W/sr)	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Intensidad luminosa	I_v (cd)	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$
Radiancia	L_e (W/sr·m ²)	$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \theta}$	Luminancia (L) o brillo (B)	L_v (nt)	$L_v = \frac{dI_v}{dS \cos \theta}$
Exposición	H (J/m ²)	$H = E_e \cdot t$	Exposición	H (lx·s)	$H = E_v \cdot t$
Unidad Fotométrica = $K_o \cdot V(\lambda) \cdot$ Unidad Radiométrica siendo $K_o = 683 \text{ lm/W}$ (a $\lambda = 555 \text{ nm}$, valor pico para visión fotópica o diurna).					
Si se quiere obtener la magnitud espectral (haz monocromático) bastará con derivar la <i>magnitud</i> definida respecto a $d\lambda$. La unidad incorporará μm o nm .					
Notación: J (julio), W (vatio), sr (estéreo-radián), V (eficiencia luminosa), lm (lúmen), lx (lux), cd (candela), nt (nit), S (superficie), τ (volumen), t (tiempo) y Ω (ángulo sólido). Unidades según el Sistema Internacional de Medidas.					

Tabla B.2: Magnitudes radiométricas y fotométricas.

B.4.1 Ángulo sólido.

Las magnitudes radiométricas y fotométricas requieren de la definición del concepto de ángulo sólido $d\Omega$ ya que a partir de éste ángulo se podrá caracterizar la emisión de una fuente y la incidencia sobre una superficie (por ejemplo, cuánta luz emite una fuente) y, también, la transferencia energética en un dispositivo óptico (por ejemplo, cuánta energía llega al sensor de una cámara; brillo o luminosidad de la imagen formada). Al igual que una magnitud de superficie le corresponde un ángulo plano que se mide en radianes, a una magnitud de volumen le corresponde un ángulo sólido o estereó que se mide en estereorradianes.

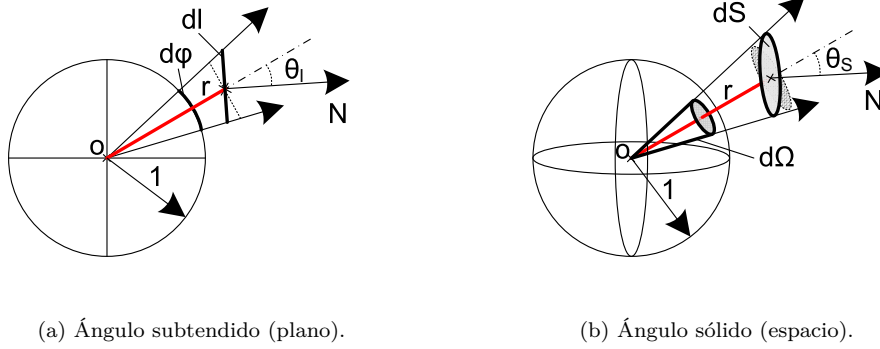


Figura B.3: Ángulos subtendidos en el plano y el espacio.

En el plano (figura B.3a), un segmento infinitesimal dl será visto desde el centro de una circunferencia, de radio unitario, a través del ángulo subtendido $d\varphi$ descrito por la proyección del segmento sobre el centro de la circunferencia (ecuación B.1). Sabiendo que la relación **arco/radio** se mantiene constante entre arcos subtendidos trazados con igual origen se aplica al arco de la circunferencia unitaria y al arco (segmento) formado a la distancia r :

$$d\varphi = \frac{dl \cdot \cos \theta_1}{r} \quad (\text{B.1})$$

donde θ_1 es el ángulo formado entre el vector normal \vec{N} al segmento y el segmento infinitesimal dl y r la distancia del segmento infinitesimal al centro de la circunferencia.

En el espacio (figura B.3b), una superficie infinitesimal dS será vista desde el centro de una esfera, de radio unitario, a través del ángulo sólido $d\Omega$ descrito por la proyección de la superficie dS sobre el centro de la esfera unitaria (ecuación B.2). Sabiendo que la relación **superficie/radio²** se mantiene constante para superficies esféricas subtendidas trazadas con igual origen se aplica a la porción de superficie de la esfera unitaria y a la porción de superficie perteneciente a la esfera de radio r .

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \theta_s}{r^2} \quad (\text{B.2})$$

donde θ_s es el ángulo formado entre el vector normal \vec{N} a la superficie y la superficie infinitesimal dS y r la distancia de la superficie infinitesimal al centro de la esfera. Algunos casos importantes son los siguientes:

- Si la distancia $r \rightarrow \infty$ entonces $\Omega \rightarrow 0$.
- Si la distancia $r \rightarrow 0$ entonces $\Omega \rightarrow 2\pi$ (hemisferio, muy útil este valor para el cálculo, por ejemplo, de la irradiancia).

El ángulo sólido se puede relacionar con la apertura \emptyset de la óptica de una cámara como se muestra en la figura B.4. En este caso, la superficie de la lente S_{Lente} será vista desde el foco bajo un ángulo sólido Ω .

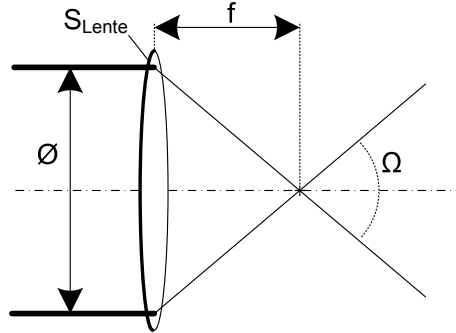


Figura B.4: Ángulo sólido y apertura de la óptica de una cámara.

Considerando una lente delgada ideal, en la que los ángulos formados por los rayos que atraviesan la lente y pasan por el foco a la distancia focal f son pequeños, la superficie S_{Lente} de un lado de la lente puede aproximarse por $\pi \cdot R^2$ siendo R el radio de la lente. Partiendo de la ecuación B.3b y sabiendo que el número-F puede expresarse como $(f/\#) = f/\emptyset$, el ángulo sólido Ω será:

$$\Omega \approx \frac{S_{\text{Lente}}}{r^2} = \frac{\pi \cdot R^2}{f^2} = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4 \cdot f^2} = \frac{\pi}{4 \cdot (f/\#)^2} \quad (\text{B.3})$$

B.4.2 Energía radiante (Q_e).

La luz es una radiación electromagnética que transporta energía radiante a través del espacio. Cuando la luz es absorbida por un objeto físico su energía es convertida en otra forma de energía (por ejemplo térmica en un microondas). La energía radiante suele denotarse como Q_e y se define como la cantidad de energía, medida en julios, que incide, atraviesa o es emitida por una superficie.

B.4.3 Flujo o potencia radiante (Φ_e).

El flujo radiante es la potencia, medida en vatios, de una radiación electromagnética definida como la energía, por unidad de tiempo, transportada por las ondas que componen la radiación. La potencia puede considerarse como la emitida por una fuente o como la que incide sobre un objeto o superficie.

B.4.4 Irradiancia y emitancia (E_e , M_e).

La irradiancia E_e y la emitancia M_e se corresponden con el concepto de densidad de flujo radiante Φ_e por unidad de superficie dS que incide sobre un punto de la superficie (irradiancia) o es emitido por un punto la superficie (emitancia).

Tanto en la irradiancia (figura B.5a) como en la emitancia (figura B.5b) han de incluirse todas las direcciones comprendidas bajo el ángulo sólido semiesférico. Ambas magnitudes son las más importante para caracterizar la incidencia o emisión de una radiación sobre o desde una superficie cuando no es necesario detallar la distribución angular o direccional de la radiación.

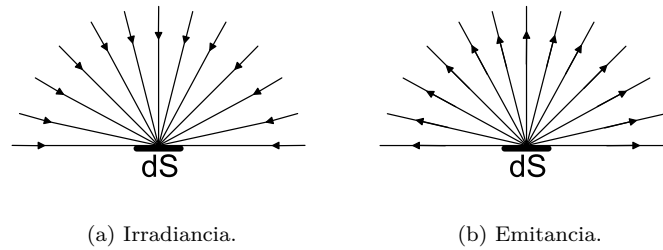


Figura B.5: Incidencia y exitancia radiante.

B.4.5 Intensidad radiante (I_e).

La intensidad radiante puede definirse como la densidad de flujo radiante Φ_e por unidad de ángulo sólido $d\Omega$ incidente o emitido desde un punto en el espacio en una dirección determinada. La cantidad de flujo radiante incidente o emitido puede ser representado como un rayo de luz dentro de un cono elemental (figura B.6a).

En la tabla B.2 se muestran la definiciones de la intensidad radiante I_e y la irradiancia E_e como:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (\text{B.4})$$

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (\text{B.5})$$

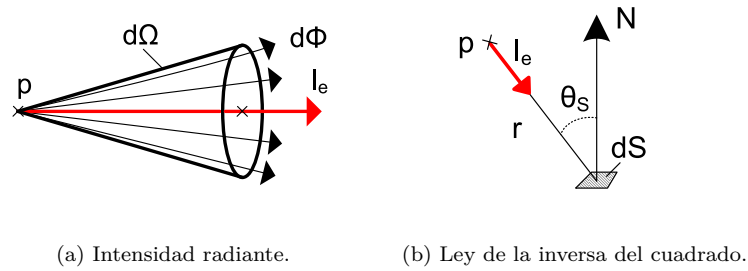


Figura B.6: Intensidad radiante e Irradiancia.

Recordando la definición que se ha visto para el ángulo sólido (ecuación B.2) y sustituyendo el valor dS en la ecuación B.5 se obtiene el siguiente valor de la irradiancia:

$$E_e = \frac{d\Phi \cdot \cos \theta_s}{d\Omega \cdot r^2} \quad (\text{B.6})$$

Aplicando la definición de la intensidad radiante I_e , dada en la ecuación B.4, se obtiene la *ley de la inversa del cuadrado* para fuentes puntuales de flujo radiante isotrópico, o lo que es lo mismo, radian la misma intensidad en todas las direcciones (ecuación B.7).

$$E_e = \frac{I_e \cdot \cos \theta_s}{r^2} \quad (\text{B.7})$$

donde I_e es la intensidad radiante de la fuente puntual p en una dirección dada θ_s y r es la distancia de la fuente al elemento superficial dS (figura B.6b).

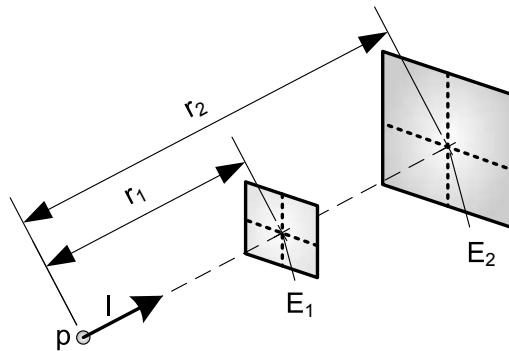


Figura B.7: Relación de irradiancias entre planos separados.

Considerando una superficie perpendicular a la dirección de la intensidad se obtiene una ecuación que responde a lo que ya, en la antigüedad, se había comprobado: *la irradiancia producida por una fuente de luz disminuye inversamente con el cuadrado de la distancia desde el plano a iluminar a la fuente.*

$$E_e = \frac{I_e}{r^2} \quad (\text{B.8})$$

De esta forma, para una fuente puntual p que emite con una intensidad radiante I (figura B.7) se puede establecer la relación de las irradiancias E_1 y E_2 que hay entre dos planos separados de la fuente puntual r_1 y r_2 respectivamente como:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(r_2)^2}{(r_1)^2} \quad (\text{B.9})$$

B.4.6 Radiancia (L_e).

La radiancia en un punto sobre una superficie es la densidad de flujo radiante Φ_e incidente, emitido o que atraviesa por unidad de ángulo sólido $d\Omega$ y por unidad de superficie dS proyectada sobre un plano normal a la dirección considerada.

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dS \cdot \cos\theta d\Omega} \quad (\text{B.10})$$

La radiancia es una función de la posición de un punto sobre una superficie definida y de la dirección considerada desde la superficie. La radiancia, según el sentido de la transferencia de energía, puede considerarse como emitida (figura B.8a) o incidente (figura B.8b).

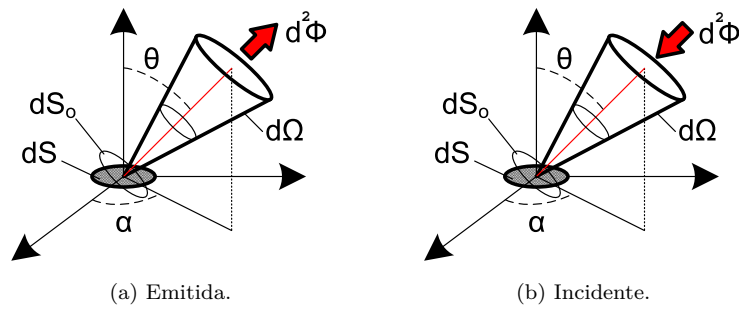


Figura B.8: Radiancia.

La irradiancia E_e y la emitancia M_e también se pueden poner en función de la radiancia L_e . Por ejemplo, en el caso de la irradiancia su forma integral es la siguiente:

$$E_e = \int_{\Omega} L_e \cdot \cos \theta d\Omega \quad (\text{B.11})$$

o en su forma diferencial, la irradiancia elemental dE_e por unidad de ángulo sólido $d\Omega$

$$dE_e = L_e \cdot \cos \theta d\Omega \quad (\text{B.12})$$

La mejor forma de realizar la medida de la luz es aplicando el concepto de radiancia debido a que, en el vacío, permanece constante a lo largo de la línea recta definida por dos puntos en los que se está transfiriendo energía desde el punto de emisión al punto de incidencia. En el caso particular de que el medio de transmisión sea el aire y los puntos de emisión e incidencia estén lo suficientemente cerca podrá asumirse que la luz no interactuará con el medio por lo que la radiancia permanecerá constante entre los dos puntos [388]. Este es el caso particular que cumplen la mayoría de los sistemas de visión lo que simplifica en gran medida los cálculos computacionales.

B.5 REFLEXIÓN DE SUPERFICIES.

En la subsección B.3.1 se han visto las formas en la que un haz luminoso puede ser reflejado cuando incide sobre la superficie de un material. Cuando una superficie lisa es iluminada la luz reflejada lo hace bajo un ángulo exactamente igual que el ángulo de incidencia θ_i (figura B.1a). Para una superficie rugosa la luz reflejada lo hará en varias direcciones (figuras B.1b, B.1c y B.1d).

Para poder determinar exactamente como va a ser reflejado un haz luminoso por una superficie sería necesario disponer de un conocimiento de la estructura de la superficie del material, es decir, un perfil completo de su superficie realizado mediante un dispositivo denominado rugosímetro. Ésto resulta excesivamente costoso cuando menos imposible en ciertas ocasiones por lo que, en general, no está justificado su uso. De ahí que, suele realizarse un modelado mediante funciones bidimensionales de distribución aleatoria consiguiendo, según el modelo elegido, aproximarse en mayor o menor grado al comportamiento real que tendría la superficie en respuesta a un haz luminoso incidente.

El estudio de la reflexión de la luz de una superficie puede modelizarse desde dos aproximaciones distintas lo que da lugar a dos tipos de modelos ópticos de reflexión: físicos y geométricos ([413]).

La *aproximación física* se basa en la teoría de ondas electromagnéticas para analizar la reflexión de la luz incidente mientras que la *aproximación geométrica* se aprovecha de la pequeña longitud de onda de la luz para simplificar el problema de la reflexión. Por esta razón los modelos creados desde el punto de vista geométrico son considerados meras aproximaciones de los creados según el punto de vista físico aunque son los primeros los más usados en visión por computador.

Dada la complejidad de los procesos que ocurren durante la transferencia de la energía de la fuente luminosa a la superficie suelen asumirse una serie de consideraciones que simplifican el fenómeno permitiendo construir los modelos que explican, de distintas formas y con distinta fidelidad, lo que ocurre durante esta transferencia. Las simplificaciones más importantes son las siguientes:

- La radiancia emitida por un punto de una superficie se debe solamente a la radiancia que incide sobre dicho punto.
- Se asume que toda la luz, de una determinada longitud de onda, reflejada por una superficie se debe a la luz que incide sobre la superficie a esa longitud de onda.
- Las superficies no generan luz internamente.

B.5.1 Textura superficial.

La textura de una superficie (figura B.9a) está basada en las desviaciones repetitivas o aleatorias de la superficie nominal de un objeto evaluándose según cuatro variables [403, 414]: ondulación, orientación, defectos o fallas y rugosidad superficial.

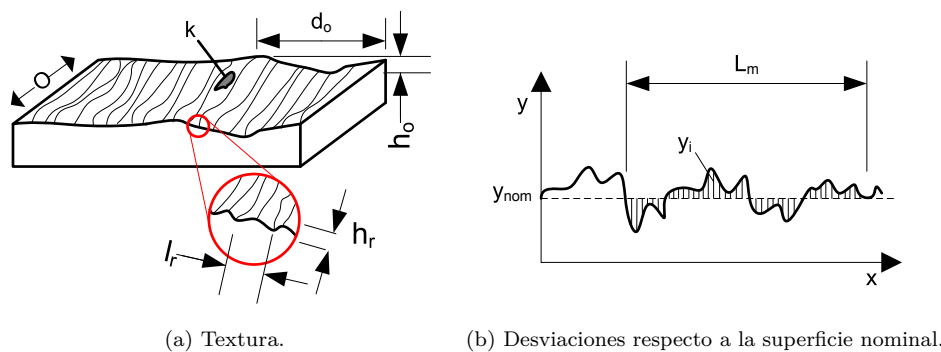


Figura B.9: Textura y rugosidad superficial.

La *ondulación* se define como las desviaciones de espaciamiento de la superficie nominal provocadas por deflexiones, vibraciones, tratamiento térmico y factores asociados con el conformado del material siendo d_o el espaciamiento y h_o la altura de la ondulación respectivamente.

La *orientación*, O , es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie. Está determinado por el proceso de fabricación para la fabricación del material.

Los *defectos*, k , son irregularidades que ocurren de forma ocasional en la superficie del material. Algunos ejemplos de defectos son las grietas, ralladuras e inclusiones.

La *rugosidad superficial* se refiere a las pequeñas desviaciones, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material siendo l_r el ancho y h_r la altura de la rugosidad respectivamente.

En la industria la rugosidad R_a , medida en μm o μ'' , suele definirse (figura B.9b) como el valor medio de las desviaciones absolutas y_i respecto al valor central o línea central y_{nom} para un determinado número de muestras n separadas según la distancia superficial L_m en la que se miden las muestras (ecuación B.13).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_{nom}| \quad (\text{B.13})$$

La línea central y_{nom} se establece de forma que el área delimitada por los puntos que quedan por encima de ésta es igual que el área delimitada por los puntos que quedan debajo.

Además del parámetro de la rugosidad R_a existen otros tres parámetros principales: R_z , R_y y R_q . El parámetro R_z es el promedio de las diferencias de altura cresta-valle, R_y es la diferencia entre el valor de la cresta más alta y del valle más profundo y R_q vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{nom})^2} \quad (\text{B.14})$$

La rugosidad R_a es uno de los parámetros más utilizados para medir los perfiles irregulares de una superficie estando estandarizados tanto el procedimiento de medida para su cuantificación como la asignación del grado de rugosidad de la superficie¹.

En el mercado existen un conjunto de patrones estándar de rugosidad superficial que se utilizan para comparar la apariencia y textura que puede tener un acero inoxidable cuando se le aplica un determinado proceso de acabado (figura B.10).

B.5.2 Modelización de la rugosidad.

Dentro de la teoría de la reflexión el concepto de rugosidad relaciona las irregularidades de la superficie con las direcciones que toma la luz cuando un haz incide sobre la superficie del material.

Un material tendrá una reflexión especular (figura B.11a) cuando las dimensiones de las irregularidades de su superficie (crestas y valles) son pequeñas comparadas con la longitudes de onda λ_i de las distintas componentes del haz ([378]) mientras que difuminará los rayos en múltiples direcciones en el caso contrario (figura B.11b).

La modelización de la rugosidad de la superficie se suele hacer de dos formas distintas [413]: modelos de distribución de altura y modelos de distribución de planos inclinados.

¹ Medida de la rugosidad por el método del perfil (norma ANSI/ASME B46.1-2002 *Surface Texture: surface roughness, waviness and lay*) [415].

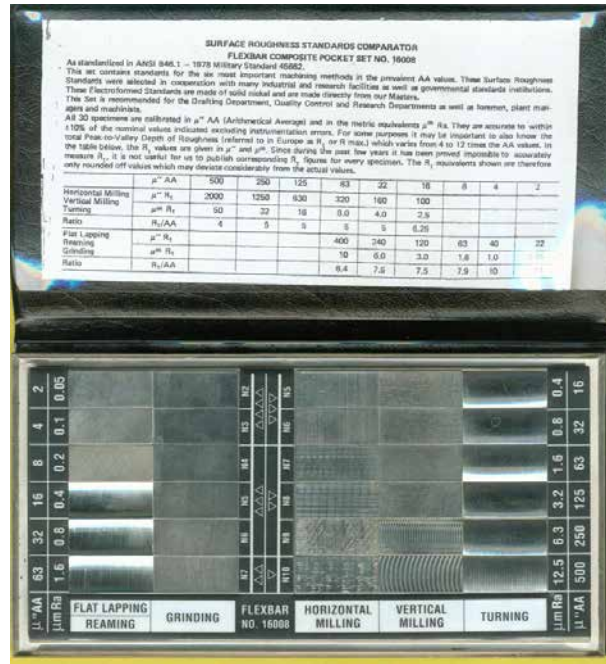


Figura B.10: Patrones flexbar 16008.

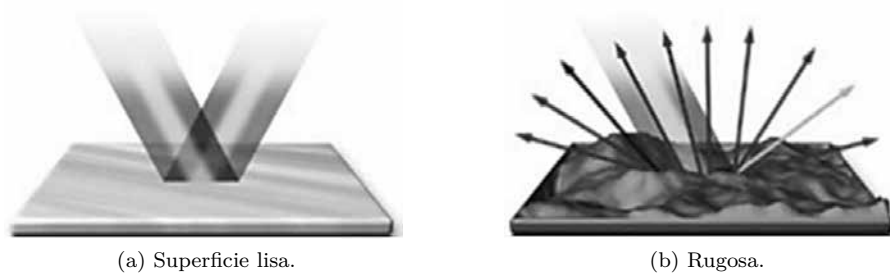


Figura B.11: Reflexión según el tipo de superficie.

Modelo basado en una función de distribución de altura (figura B.12a).

Se trata de modelos en los que la altura de la superficie respecto a la superficie nominal se representa como una función de las coordenadas x e y . La forma de la superficie queda determinada por una función de distribución basada en la altura.

A modo ejemplo, si se considera la altura una variable aleatoria h que responde a una distribución normal con valor medio $h = 0$ y desviación estándar σ_h tenemos que la forma de la superficie queda determinada la función de densidad unidimensional que modela la forma de la superficie resulta ser:

$$\rho_h(h) = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (h/\sigma_h)^2} \quad (B.15)$$

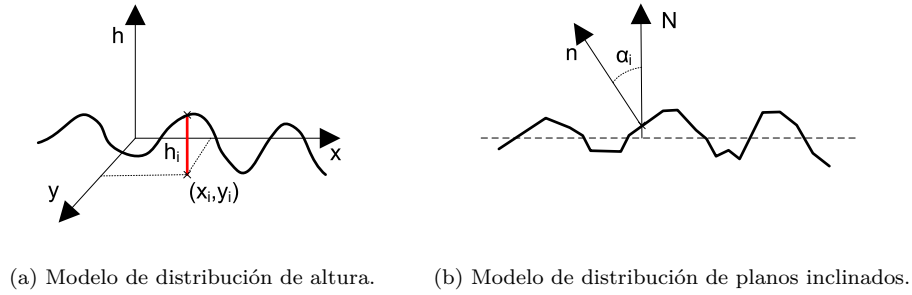


Figura B.12: Modelización de la rugosidad.

donde σ_h representa la rugosidad superficial. La única característica que no puede representar esta función es la distancia entre valles y crestas de la superficie. Para poder definir esta característica adicional de la superficie se suele introducir un coeficiente de autocorrelación $C(\tau)$ que mide la correlación entre dos puntos aleatorios de la superficie (x_1, y_1) y (x_2, y_2) separados por una distancia τ .

$$C(\tau) = e^{-(\tau/T)^2} \quad (\text{B.16})$$

donde T representa la distancia de correlación en la que $C(\tau)$ resulta ser e^{-1} .

Resumiendo, los modelos basados en funciones de distribución de altura resultan ser modelos bastante robustos con dos parámetros que nos definen la rugosidad de la superficie y la distancia entre crestas y valles.

Modelo basado en una función de distribución de inclinación (figura B.12b).

Este modelo se basa en la construcción de la superficie mediante la composición de microsuperficies planares inclinadas, cada una de ellas, con una determinada orientación.

El ángulo de inclinación α_i formado entre la normal a la superficie nominal y la normal al microplano i considerado define cada plano individual. De esta manera, se podría definir la rugosidad de una superficie como una función basada en los valores de los ángulos de inclinación de los microplanos.

Por ejemplo, en una superficie isótropa cuyas características superficiales son iguales independientemente de la dirección considerada, la forma de la superficie se podría modelar como una función de densidad unidimensional ρ_α siendo la inclinación α una variable aleatoria normalmente distribuida con valor medio $\alpha = 0$ y desviación estándar σ_α :

$$\rho_\alpha(\alpha) = \frac{1}{\sigma_\alpha \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\alpha/\sigma_\alpha)^2} \quad (\text{B.17})$$

El valor de σ_α representaría la rugosidad de la superficie siendo más rugosa cuanto mayor sea su valor y más suave cuanto menor sea este valor.

Los modelos basados en funciones de distribución de inclinación son muy populares en el análisis de la reflexión de superficies puesto que la dispersión de los rayos de luz están basados en la inclinación local de las superficies más que en la altura local. Por otro lado, tienen la ventaja de que con solo un parámetro, a costa de tener un modelo un poco más débil, representan un modelo de representación superficial de la rugosidad bastante aceptable.

B.5.3 Función de distribución de reflectancia bidireccional.

La función de distribución de reflectancia bidireccional, *BRDF*, describe la relación entre la cantidad de iluminación que llega a una superficie procedente de una fuente luminosa y la reflejada por la superficie. Por tanto, se trata de una función que depende de la dirección en la que llega la luz a la superficie y de la dirección en la que la deja.

El uso de esta función se ha extendido a gran variedad de aplicaciones, entre ellas, la caracterización de sistemas de iluminación y superficies. Aunque pueden realizarse mediciones de la *BRDF* de superficies respecto diferentes tipos de fuentes de iluminación [416], por lo general, suele ser un procedimiento bastante complejo y costoso. Partiendo del modelo de función de reflectancia bidireccional básico han aparecido algunas investigaciones con particularizaciones del modelo [417].

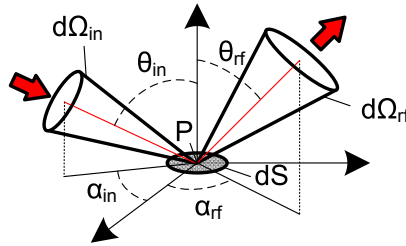


Figura B.13: BRDF.

Denotemos la radiancia L_{in} incidente sobre un punto P de una superficie dS desde una fuente luminosa ubicada según las coordenadas esféricas θ_{in} y α_{in} como $L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in})$ y la radiancia L_{rf} reflejada desde el mismo punto de la superficie en una dirección determinada θ_{rf} y α_{rf} como $L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf})$ (figura B.13).

Formalmente, la función *BRDF* se define como la relación entre la radiancia reflejada por la superficie y la irradiancia de la fuente luminosa en la dirección incidente (irradiancia direccional).

$$\rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) = \frac{L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf})}{E_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in})} = \frac{L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf})}{L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega_{in}} \quad (B.18)$$

La unidad física de la función de distribución de reflectancia bidireccional ρ_{bd} es la inversa del estereoradian sr^{-1} y puede variar entre 0 (no hay reflexión) e ∞ .

La radiancia reflejada desde una superficie debida a la irradiancia en una dirección determinada se puede obtener de la ecuación B.18.

$$L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf}) = \rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega_{in} \quad (\text{B.19})$$

Por otro lado, la radiancia reflejada de una superficie debida a la irradiancia considerando todas las direcciones comprendidas por un hemisferio ($\Omega_{in} = \pi$) es:

$$L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf}) = \int_{\Omega_{in}} \rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega_{in} \quad (\text{B.20})$$

Aunque a nivel conceptual el *BRDF* queda claramente definido, desde un punto de vista práctico resulta ser un parámetro bastante difícil de determinar, aunque no imposible. De hecho, existen bases de datos de coeficientes *BRDF* para distintas clases de materiales obtenidos de forma empírica mediante gonioreflectómetros (para superficies isotrópicas [418] y anisotrópicas [419]). En las superficies isotrópicas el *BRDF* no varía cuando la superficie rota respecto a su normal mientras que en las anisotrópicas sí.

En cualquier caso, resulta ser un parámetro bastante complejo de determinar por lo que suele usarse otro parámetro denominado reflectancia direccional hemisférica ρ_{dh} definida como la fracción de la irradiancia en la dirección incidente que es reflejada por la superficie en todas las direcciones definidas para un hemisferio.

$$\rho_{dh}(\theta_{in}, \alpha_{in}) = \frac{\int_{\Omega_{rf}} L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf}) \cdot \cos \theta_{rf} d\Omega_{rf}}{L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega_{in}} \quad (\text{B.21})$$

$$\rho_{dh}(\theta_{in}, \alpha_{in}) = \int_{\Omega_{rf}} \left(\frac{L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf})}{L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega_{in}} \right) \cdot \cos \theta_{rf} d\Omega_{rf} \quad (\text{B.22})$$

$$\rho_{dh}(\theta_{in}, \alpha_{in}) = \int_{\Omega_{rf}} \rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{rf} d\Omega_{rf} \quad (\text{B.23})$$

La reflectancia direccional hemisférica ρ_{dh} es adimensional y tiene valores comprendidos entre 0 y 1. Es un parámetro que puede ser medido de forma sencilla para cualquier superficie.

B.6 TIPOS DE SUPERFICIES.

B.6.1 Superficies lambertianas.

Los mecanismos de la reflexión difusa fueron estudiados inicialmente por Lambert [420]. Las superficies que satisfacen las leyes de Lambert, conocidas como superficies difusas ideales o lambertianas, se caracterizan porque la radiancia reflejada por la superficie es igual para todas las direcciones independientemente del ángulo que forme con la superficie (figura B.14).

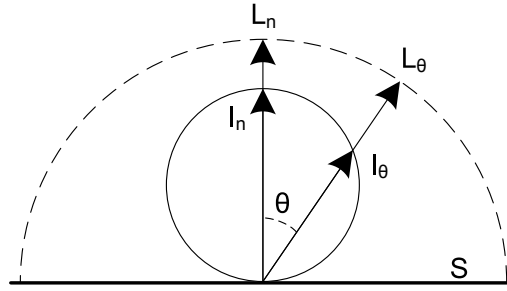


Figura B.14: Ley del coseno.

Esta característica de las superficies lambertianas proviene del cumplimiento de la denominada *ley del coseno de Lambert*: la intensidad radiante I_θ observada desde una superficie lambertiana es directamente proporcional al coseno del ángulo θ entre la dirección de observación o incidencia y la dirección \mathbf{n} normal a la superficie.

$$I_\theta = I_n \cdot \cos \theta \quad (\text{B.24})$$

Así, estas superficies se verán igualmente brillantes desde cualquier dirección de observación independientemente del tipo de iluminación. Aunque en la realidad no existen superficies lambertianas perfectas el algodón, el cartón, el yeso, metales líquidos, el papel y ciertas pinturas mate se aproximan al comportamiento ideal.

Las superficies lambertianas van a cumplir las siguientes características:

- La radiancia reflejada no depende de la dirección y es constante: $L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf}) = L_{rf} = \text{cte.}$
- La $BDRF$ es constante: $\rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) = \rho_{bd} = \text{cte.}$
- La reflectancia direccional hemisférica ρ_{dh} es independiente de la dirección. Ésta se suele denominar reflectancia difusa o albedo y escribirse como ρ_d .

- La exitancia M_{rf} se relaciona con la radiancia reflejada L_{rf} por un factor π . La exitancia se puede calcular como la integral de la radiancia reflejada a lo largo de un ángulo sólido correspondiente con una semiesfera, $\Omega_{rf} = \pi$:

$$M_{rf} = \int_{\Omega_{rf}} L_{rf} d\Omega_{rf} = L_{rf} \cdot \pi \quad (B.25)$$

Dada una superficie lambertiana con una *BRDF* $\rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) = \rho_{bd}$ se tiene:

$$\rho_d = \int_{\Omega_{rf}} \rho_{bd}(\theta_{rf}, \alpha_{rf}, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{rf} d\Omega_{rf} = \int_{\Omega_{rf}} \rho_{bd} \cdot \cos \theta_{rf} d\Omega_{rf} \quad (B.26)$$

Escribiendo Ω en términos de θ y α

$$\rho_d = \rho_{bd} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos \theta_{rf} \cdot \sin \alpha_{rf} d\theta_{rf} d\alpha_{rf} = \rho_{bd} \cdot \pi \quad (B.27)$$

Por tanto, para las superficies lambertianas con una reflectancia difusa o albedo ρ_d (reflectancia direccional hemisférica particularizada para superficies difusoras o lambertianas) la función de distribución de reflectancia bidireccional ρ_{bd} será:

$$\rho_{bd} = \frac{L_{rf}}{E_{in}} = \frac{\rho_d}{\pi} \quad (B.28)$$

Despejando L_{rf} de la ecuación B.28 se obtiene la radiancia reflejada por la superficie en función del albedo y la irradiancia.

$$L_{rf} = \frac{\rho_d}{\pi} \cdot E_{in} \quad (B.29)$$

Un tratamiento más profundo sobre el modelo de reflexión de superficies lambertianas y un modelo generalizado viene desarrollado en [421].

B.6.2 Superficies especulares.

Las superficies especulares (figura B.1a) tienen un comportamiento semejante a un espejo en el que la radiación que llega a la superficie desde una dirección determinada es reflejada en otra dirección denominada dirección especular θ_s . Ésta es la respuesta del reflector ideal y pocas superficies se comportan así por lo que, en general, cuando una radiación incide en una dirección determinada es reflejada en una serie de direcciones formando un pequeño lóbulo alrededor de la dirección especular (figura B.15) provocando un efecto de difuminación.

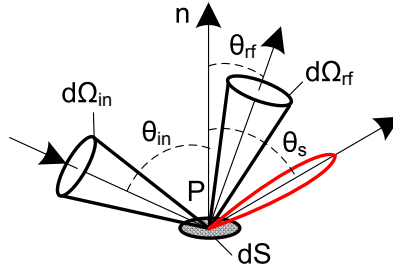


Figura B.15: Superficies especulares.

Cuando los lóbulos que se forman son grandes la radiación incidente se difumina en un mayor número de direcciones percibiendo un brillo más atenuado sobre la superficie y, al contrario, cuando los lóbulos son más pequeños la difuminación es menor percibiéndose un brillo muy intenso sobre una pequeña área de la superficie alrededor de la dirección de reflexión.

Uno de los modelos de reflexión de superficies especulares más conocidos y sencillos es el de Phong [422] usado con fuentes luminosas puntuales y se basa, fundamentalmente, en modelar el tamaño del lóbulo de reflexión a partir del ángulo de reflexión θ_{rf} (o de ubicación del observador), la dirección especular θ_s y un índice de la rugosidad de la superficie n .

La radiancia reflejada L_{rf} es proporcional a $\cos^n \delta\theta = \cos^n(\theta_{rf} - \theta_s)$. Valores grandes de n significarán lóbulos más pequeños y afilados mientras que valores pequeños serán lóbulos grandes y abiertos.

B.6.3 Superficies compuestas.

Muy pocas superficies son idealmente difusas o perfectamente especulares, al contrario, una mezcla de ambas. Así, la función *BRDF* de muchas superficies puede aproximarse como una combinación de ambos tipos considerando una componente lambertiana y una componente especular. Ésta última componente suele ser ponderada por el denominador albedo especular ρ_s . Una aproximación que suele usarse es la siguiente:

$$L_{rf}(P, \theta_{rf}, \alpha_{rf}) = \rho_d \int_{\Omega} L_{in}(P, \theta_{in}, \alpha_{in}) \cdot \cos \theta_{in} d\Omega + \rho_s \cdot L_s(P, \theta_s, \alpha_s) \cdot \cos^n(\theta_{rf} - \theta_s) \quad (B.30)$$

Originalmente, el modelo compuesto se debe a Cook, Torrance y Sparrow [423, 424]. Otros modelos de reflexión que combinan la descripción estadística de la rugosidad de las superficies, vistas en la sección B.5, conjuntamente con ciertas consideraciones electromagnéticas vienen dadas por Beckmann y Spizzichino [425]. En otros artículos se hacen recapitulaciones y comparaciones entre modelos existentes [426].

Durante las dos últimas décadas se ha estado avanzando en la creación de nuevos modelos de reflectancia que, en la mayoría de los casos, son modelos que integran aspectos fundamentales de cada modelo de reflectancia básico [427]. En el caso particular de la inspección de superficies de acero también se ha investigado y desarrollado algún modelo de reflexión compuesta con bastante éxito [428].

B.7 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS METALES.

La característica principal de los metales es la presencia sobre su superficie de un determinado número de electrones libres cuyo movimiento constituye una corriente. La corriente por unidad de área, \vec{J} , que resulta de la aplicación de un campo eléctrico \vec{E} se relaciona con la conductividad del medio σ por medio de la ecuación $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (Ley de Ohm).

Para un material dieléctrico no hay electrones libres y $\sigma = 0$ mientras que para los metales $\sigma \neq 0$ y finito. Si se considerara un metal *ideal* su conductividad sería $\sigma = \infty$. Ésto es equivalente a decir que los electrones son conducidos por la oscilación armónica del campo eléctrico \vec{E} aplicado.

Los electrones de conducción son los principales contribuidores de las propiedades ópticas de los metales. En un metal *real* los electrones de conducción sufren colisiones con la propia estructura cristalina, agitada térmicamente, o con las imperfecciones convirtiendo la energía electromagnética en calor debido al efecto Joule. La absorción de la energía radiante por un material será función de su conductividad.

El estudio de la reflexión y la refracción aporta mayor conocimiento mediante la aproximación de la *Teoría Electromagnética*. Para ello se considera una onda luminosa monocromática incidente plana propagándose en la dirección \mathbf{y} como:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - ky) \quad (\text{B.31})$$

donde \vec{E}_0 es la amplitud del campo eléctrico, ω es la frecuencia angular y k es el número de onda angular equivalente a $2\pi/\lambda$ siendo λ la longitud de onda.

Introduciendo ahora el índice de refracción en forma compleja $\tilde{n} = n_R - i n_I$ con sus componentes de refracción real n_R e imaginaria n_I se introduce en la ecuación obteniendo:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega \left(t - \frac{\tilde{n} \cdot y}{c} \right) \quad (\text{B.32})$$

sustituyendo el valor de \tilde{n}

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp \left(\frac{-\omega \cdot n_I}{c} \right) \cos \omega \left(t - \frac{n_R \cdot y}{c} \right) \quad (\text{B.33})$$

La ecuación B.33 se puede interpretar como el avance de la onda \vec{a}_y en la dirección y , penetrando el material a una velocidad c/n_R , mientras la amplitud \vec{E}_0 es atenuada exponencialmente.

Considerando que la irradiancia I es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico \vec{E}_0 la atenuación de la irradiancia se puede poner como:

$$I(y) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \omega \cdot n_I}{c} \cdot y\right) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot y) \quad (\text{B.34})$$

donde α se denomina *coeficiente de absorción* o *atenuación*. La profundidad de penetración se define como aquella profundidad que hace que la irradiancia caiga a un valor de $1/3$ ($\approx e^{-1}$) del valor de su amplitud I_0 . Esta profundidad se alcanzará cuando $y = 1/\alpha$.

En el caso de los materiales transparentes la profundidad de penetración es muy grande comparada con su espesor. En los metales la profundidad de penetración es extremadamente pequeña.

La mayoría de los metales tienen una apariencia gris plateada como el aluminio, el estaño o el acero. El brillo *metálico* de estos materiales se corresponde con una alta reflectancia debida a que la onda incidente no es capaz de penetrar el material siendo reflejada en un alto porcentaje (entre un 85 y un 95 %) independientemente de la longitud de onda que tenga.

El índice de refracción de los metales por lo general es un número complejo que depende de la frecuencia de la onda que incide sobre la superficie del metal. La pequeña absorción que se produce variará según la frecuencia de la onda incidente lo que dará lugar a una mayor reflexión de ciertas longitudes de onda lo que caracterizará el ligero colorido que tienen determinados metales. Por ejemplo, el oro y el cobre reflejarán un color gris con cierto colorido amarillo-rojizo este último como consecuencia de una mayor reflectividad de las longitudes de onda cercanas al infrarrojo.

Consideraciones sobre el índice de refracción complejo, así como, su cálculo a través de la ecuación de dispersión vienen desarrollados más ampliamente en los capítulos 3 y 4 del libro [378].

TIPOS Y FUENTES DE ILUMINACIÓN

C.1 TIPOS DE ILUMINACIÓN.

c.1.1 *Direccional.*

Iluminación basada en la generación de un haz luminoso altamente direccional con la finalidad de resaltar, en los objetos que son iluminados, ciertos detalles que solo son visibles orientando la fuente luminosa de forma lateral a la cámara (figura C.1). La forma y orientación del haz luminoso dependerá de la aplicación y el objeto a analizar.

Resulta ser una técnica que se utiliza en aplicaciones de localización y reconocimiento de piezas y en inspecciones superficiales de objetos usando la información generada por las sombras para detectar los defectos.

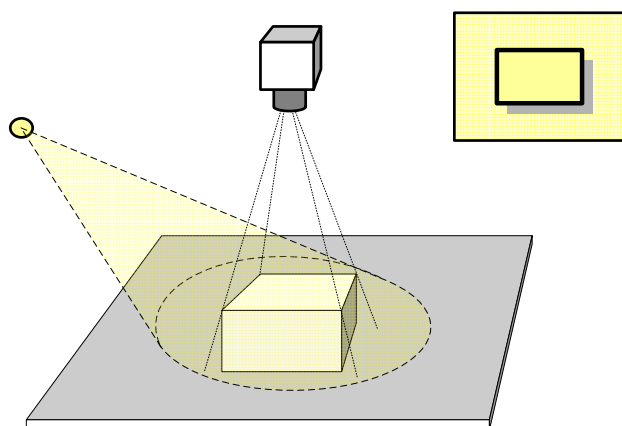


Figura C.1: Iluminación direccional.

Esta técnica tiene la ventaja de ser fácil de implementar, flexible y adaptable, bastante brillante y relativamente uniforme. Por contra, tiene el inconveniente de generar sombras inadecuadas y brillos excesivos, esto último, sobre todo en superficies reflectivas.

Para este tipo de iluminación suelen usarse fuentes de luz de tipo fibra óptica, fluorescentes y paneles de luz.

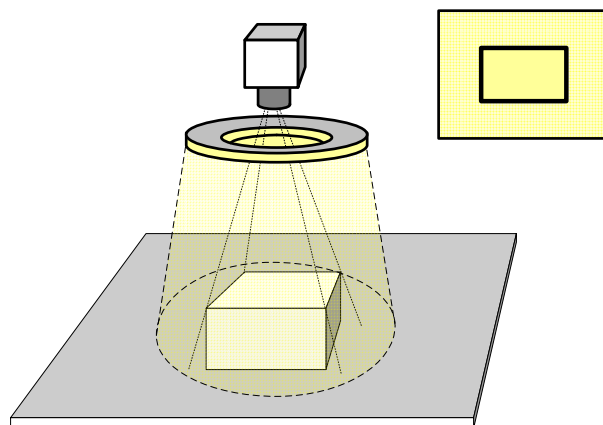
c.1.2 *Difusa.*

Se trata de un técnica de iluminación cuya finalidad es la generación de haces luminosos que incidan en el objeto desde todas las direcciones.

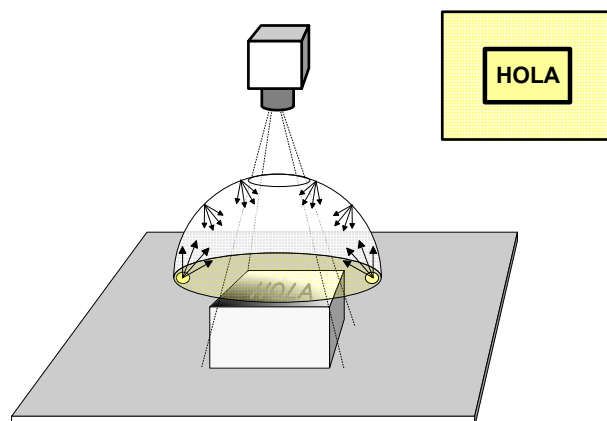
Los objetos que se analizan presentan superficies suaves y regulares. Proporciona el mínimo contraste del objeto ya que elimina cualquier sombra.

Fuentes de luz de iluminación difusa:

- Fluorescentes circulares.
- Anillos de diodos LED (figura C.2a).
- Anillos de fibra óptica.
- Difusor semiesférico (figura C.2b).



(a) Anillos difusores.



(b) Difusor semiesférico.

Figura C.2: Iluminación difusa.

Las tres primeras fuentes de iluminación difusa suelen emplearse en la denominada iluminación difusa de campo claro o frontal. El difusor semiesférico (figura C.2b) ofrece el máximo nivel posible en iluminación difusa. Se utiliza en las aplicaciones más complejas como son la iluminación de superficies especulares, instrumentación médica, latas, discos compactos, etc.

La técnica de iluminación difusa reduce brillos y reflejos proporcionando una iluminación muy uniforme. Suele utilizarse cuando se requiere iluminar superficies de objetos reflectantes. Entre los inconvenientes cabe destacar que se trata de una técnica que emplea elementos bastante voluminosos por lo que es difícil de emplear en espacios confinados. Por otro lado, disminuye el contraste en la superficie al eliminar cualquier tipo de sombra.

c.1.3 *A contraluz.*

Técnica consistente en iluminar el objeto de tal manera que éste quede entre la fuente luminosa y la cámara (figura C.3). La iluminación puede ser tanto direccional como difusa. Las imágenes que se generan tienen máximo contraste (prácticamente son imágenes binarias), ya que la parte de la imagen libre de objeto queda brillante y la parte visible del objeto oscura (silueta del objeto).

Esta técnica está indicada en aplicaciones en las que se quiera realizar la localización de piezas, análisis de formas y dimensiones, presencia de taladros internos en piezas, detección de bordes, detección de manchas, rayas y grietas en materiales translúcidos o transparentes, etc.

El inconveniente es la pérdida de detalles superficiales del objeto, así como, la saturación de elementos sensibles de la cámara CCD provocando el efecto de blooming. Este efecto consiste en la transferencia de carga desde los elementos sensibles saturados a elementos adyacentes no saturados provocando un error en los valores de la señal de estos últimos. Este efecto repercutirá, sobre todo, en aplicaciones de tipo dimensional ya que *engaña* en las dimensiones del objeto que se está midiendo.

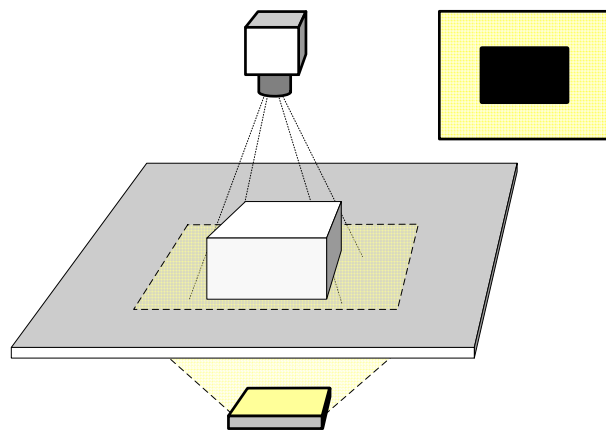


Figura C.3: Iluminación a contraluz.

c.1.4 *Estructurada.*

Es una técnica de iluminación que se utiliza normalmente para resaltar o determinar la tercer dimensión de un objeto.

El método utilizado consiste en posicionar una fuente de luz de emisión láser que proyecte un determinado patrón de luz conocido sobre el objeto (figura C.4). Estos patrones pueden ser en forma de rejilla de puntos, líneas direccionales paralelas, cruzadas, círculos concéntricos, etc. Mediante el análisis de la distorsión del patrón provocada por la superficie del objeto puede interpretarse su profundidad, obtener características tridimensionales, etc.

Para poder obtener la tercera dimensión, de manera que el objeto pueda ser reconstruido, es necesario que el tamaño del patrón sea lo más pequeño posible y ser proyectado sobre un fondo con muy baja o nula iluminación. Por otro lado, ciertos colores pueden absorber gran cantidad de la emisión láser dificultando la implementación de este sistema (requieren fuentes más potentes y de mayor coste, cuando menos) .

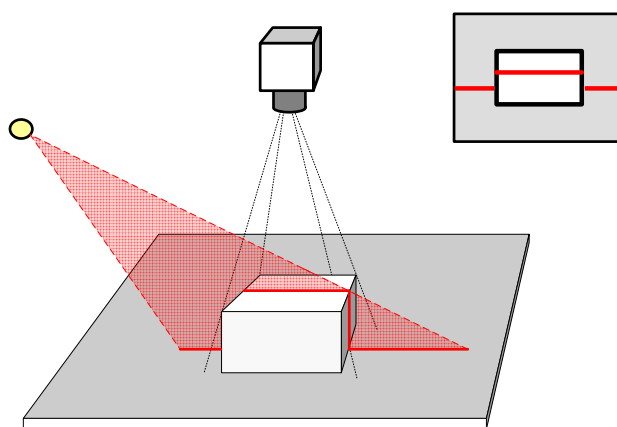


Figura C.4: Iluminación estructurada.

c.1.5 *Coaxial.*

Técnica utilizada para iluminar objetos reflectantes. La luz se emite de forma lateral sobre un espejo semitransparente, denominado beam splitter, que desvía todos los haces provenientes de la fuente de luz en la misma dirección (luz colimada) que el eje de la cámara (figura C.5). De esta forma se consigue una luz difusa homogénea libre de sombras.

Resulta ser una técnica ideal para aplicaciones de inspección de tarjetas de circuito impreso, etiquetas reflectantes, papel de aluminio, blíster farmacéuticos, códigos de barra o matriz en superficies reflectantes, etc. El inconveniente más importante de estos sistemas es su elevado coste.

c.1.6 *Campo oscuro.*

Se trata de una técnica de iluminación tanto para cuerpos opacos como transparentes. En el caso de los cuerpos opacos se utiliza para resaltar defectos superficiales, grietas, surcos, etc. Otra utilización que suele darse es la identificación y lectura de caracteres, códigos de matriz o códigos de barra grabados sobre la superficie del objeto.

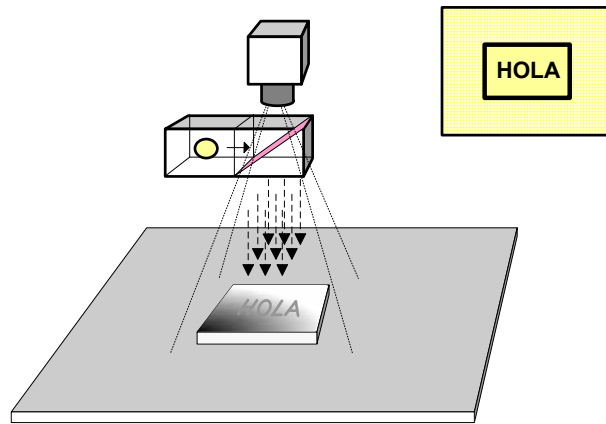


Figura C.5: Iluminación coaxial.

Los elementos que suelen utilizarse para este tipo de iluminación son anillos de luz que emiten los haces prácticamente perpendiculares al eje óptico de la cámara (figura C.6). No es adecuada para superficies u objetos planos.

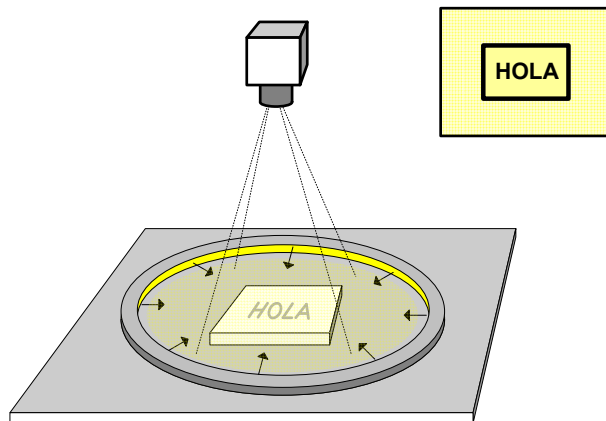


Figura C.6: Iluminación de campo oscuro.

En los materiales transparentes el objetivo es iluminar los bordes del material (por ejemplo una bombilla o lámpara) y que contraste con el fondo. Para conseguir este fenómeno se parte de la configuración empleada en la técnica a contraluz poniendo el cuerpo u objeto a analizar entre la fuente de luz y la cámara. La diferencia se va a encontrar en la fuente de luz. En ésta, se oculta una parte de la misma con una lámina opaca del mismo tamaño que el objeto. Si no hay objeto la luz no llegará a la cámara viéndose la imagen completamente negra. Si hay objeto, la parte interna se verá oscura y el borde se verá brillante contrastando perfectamente debido a que los haces que alcanzan el borde se desvían llegando a la cámara.

C.1.7 Luz polarizada.

En una onda electromagnética no polarizada, como suele considerarse a la luz natural, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. El objetivo de esta técnica es generar luz polarizada linealmente (luz cuyo campo eléctrico oscila en un determinado plano denominado plano de polarización) partiendo de una fuente de luz no polarizada. Existen varias posibilidades para generar la polarización de la luz: por absorción selectiva (dicroísmo), por reflexión, por dispersión y por doble refracción (birrefringencia) mediante algunos materiales como la calcita.

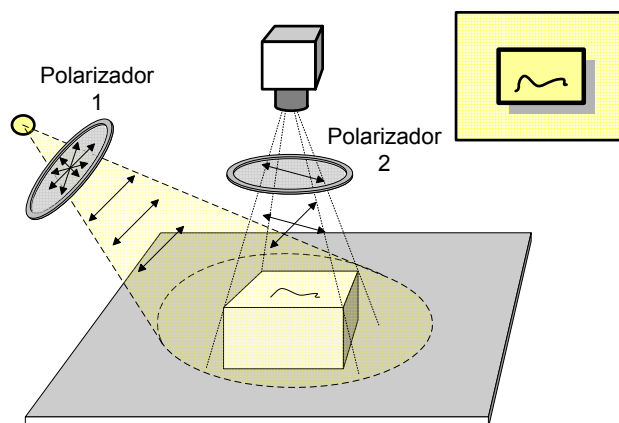


Figura C.7: Iluminación por luz polarizada.

La figura C.7 muestra un sistema de iluminación por luz polarizada. La polarización de la luz emitida por la fuente se realiza mediante el polarizador 1. Éste solamente deja pasar las ondas provenientes de la fuente que oscilan en el plano de polarización para el que está diseñado el polarizador. Los haces de luz, ya polarizados, incidirán sobre el objeto y serán reflejados de manera que algunos de ellos mantendrán el plano de polarización y otros cambiarán de plano de polarización (por ejemplo, por reflexión de la luz sobre agua). El polarizador 2 (denominado también analizador) impedirá el paso de estos últimos dejando pasar a la cámara los primeros.

Las aplicaciones más importantes de la técnica por iluminación polarizada son:

- Mejora del contraste en la imagen.
- Eliminación de reflejos producidos por superficies altamente reflectivas como agua o cristal.
- Reducción de brillos en superficies reflectivas para detección de detalles superficiales.
- Detección de defectos en materiales transparentes (éstos muestran actividad óptica: provocan una rotación en el plano de polarización de la luz que los atraviesan).
- Aplicaciones científicas como por ejemplo la medida de la actividad de sustancias con actividad óptica.

c.1.8 Resumen y selección de técnicas de iluminación.

La figura C.8 muestra una comparación de los efectos producidos sobre un determinado objeto según la técnica de iluminación empleada.

En función de los requerimientos de la aplicación y del tipo de objeto sobre el que se realiza la inspección se selecciona la técnica de iluminación a implementar (tabla C.1).

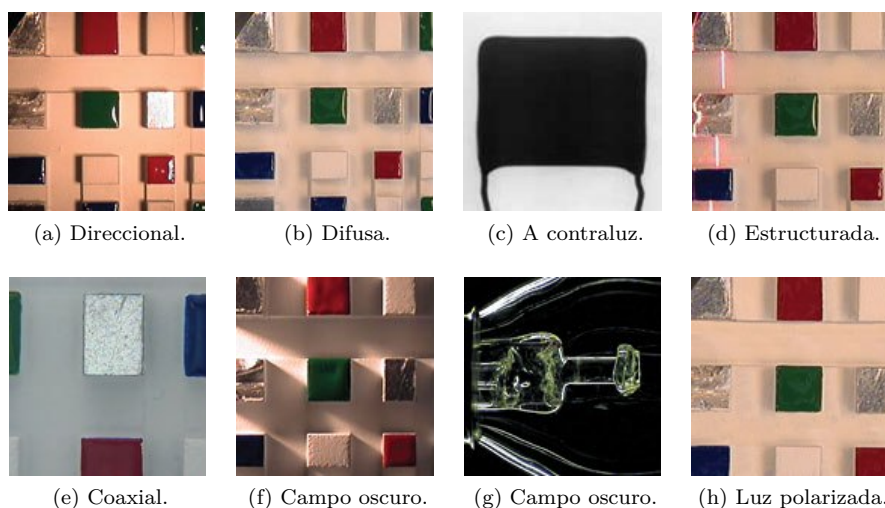


Figura C.8: Comparación de técnicas de iluminación.

Por otro lado, existen herramientas informáticas que pueden ayudar en la elección del método de iluminación más adecuado para una aplicación como es, por ejemplo, el *Lighting Advisor* con unas 180 técnicas de iluminación [42].

C.2 FUENTES DE LUZ.

c.2.1 Fuentes incandescentes.

Se trata de un tipo de fuente de bajo coste, fácil de usar e intensiva desde el punto de vista de la utilización. Por lo general suelen ser fuentes en las que se puede controlar la intensidad luminosa que emiten ya sea de forma manual o automática.

Como inconveniente, cabe destacar que son fuentes con un bajo rendimiento luminoso: prácticamente toda la potencia eléctrica consumida por la fuente se transforma en calor.

Se suelen utilizar en técnicas de iluminación direccional, iluminación a contraluz e iluminación de campo oscuro (objetos transparentes).

REQUERIMIENTOS APLICACIÓN	OBJETO INSPECCIONADO	TIPO ILUMINACIÓN
- Reducir especularidad	- Objeto brillante	- Difusa frontal - Coaxial - Luz polarizada
- Iluminación uniforme	- Cualquier objeto	- Difusa frontal - Coaxial
Acentuar: - Defecto superficial - Geometría	- Objeto plano	- Direccional - Luz estructurada
- Resaltar textura	- Cualquier objeto	- Direccional - Luz estructurada
- Reducir sombras	- Objeto con salientes - Objeto 3-D	- Difusa frontal - Coaxial
- Resaltar defecto interno	- Objeto transparente	- Campo oscuro
- Resaltar silueta	- Cualquier objeto	- Contraluz
- Perfil 3-D	- Objeto con salientes - Objeto 3-D	- Luz estructurada

Tabla C.1: Criterios generales para la elección del tipo de iluminación ([1]).

c.2.2 Fuentes de descarga: fluorescentes.

Son fuentes de luz bastante eficientes por lo que la potencia eléctrica consumida por éstas suele ser pequeña. Con diversidad de tamaños, colores y formas constructivas desde simples barras y círculos hasta cualquier forma imaginable se adaptan fácilmente a la aplicación (figuras C.9a, C.9b y C.9c). Los fluorescentes tienen como principal inconveniente que no pueden funcionar a baja temperatura. Otro inconveniente es la disminución en el nivel de intensidad lumínica generado con el paso del tiempo.

Los fluorescentes, fundamentalmente son usados cuando se requiere la implementación de técnicas de iluminación difusa. Una aplicación bastante típica es la iluminación de superficies de objetos con alto índice de reflexión.

En aplicaciones industriales han de usarse fluorescentes con espectro de luz conocido. Suele ser bastante habitual el uso de fluorescentes monocromáticos (ultravioleta, amarillo, verde, azul, etc.). Para este tipo de aplicaciones también es importante que la luz generada por el fluorescente sea lo más homogénea posible. En el caso de que la aplicación sea de alta velocidad, por ejemplo en la adquisición de imágenes con cámaras lineales, el fluorescente debe llevar incorporado un balasto electrónico de alta frecuencia para evitar el efecto de parpadeo en la imagen. Cuando se requiere maximizar la potencia lumínica en un área reducida suelen utilizarse unos tipos especiales de fluorescentes, denominados de *apertura* (figura C.9d), en los que la apertura de salida por la que se proyecta la luz queda reducida.



Figura C.9: Fluorescentes.

c.2.3 Diodos LED.

Las fuentes construídas con diodos LED generan una luz monocroma en una gran variedad de colores (luz blanca, azul, verde, rojo e infrarrojo). Entre las principales ventajas que tienen las fuentes de diodos LED son su larga vida (aproximadamente 100.000 horas), gran flexibilidad de diseño que permite múltiples formas, bajo coste, no requieren un sistema de refrigeración y disponen de una alta velocidad de conmutación. Actualmente se han introducido los LED de alta potencia de tal manera que si se conectan a un sistema estroboscópico se pueden alcanzar potencias similares a las fuentes incandescentes. Se suelen utilizar en técnicas de iluminación difusa, direccional, campo oscuro y a contraluz.

Las formas más comunes de fuentes de iluminación LED son en forma de paneles (figura C.10a), anillos (figuras C.10b, C.10c y C.10d), domos (figura C.10e), lineal (figura C.10f), puntual (figura C.10g), rectangular (Figura C.10h) y diodos SMD integrados en un circuito impreso.

c.2.4 Luz estroboscópica.

Fuente de luz ideal cuando se requiere el análisis de objetos o superficies en movimiento. Cuando la velocidad a la que pasa el objeto a inspeccionar es muy elevada, la imagen capturada puede aparecer desenfocada debido al efecto del movimiento del objeto. Para eliminar este efecto hay dos posibilidades: aumentar la velocidad de obturación de la cámara (shutter) de forma que el tiempo de exposición del sensor de la cámara sea muy corto lo que requiere una fuente luminosa continua de gran potencia, o bien, la utilización de luz pulsada o estroboscópica (figura C.11).

La característica fundamental de las fuentes de luz estroboscópica es que proporcionan una gran intensidad en un instante de tiempo muy pequeño (microsegundos o fracción de microsegundo) por lo que la iluminación ambiente afecta poco en el sistema de visión.



Figura C.10: LED.

Los inconvenientes principales de las fuentes de luz estroboscópica son:

- Necesitan una fuente de tensión especial.
- El pulso y duración del disparo del estroboscopio ha de estar sincronizado con la cámara.
- La intensidad lumínica generada por la fuente va decreciendo con el tiempo de vida.

c.2.5 Láser.

El láser va a proporcionar una fuente de luz utilizada en iluminación estructurada para realizar medidas o representaciones tridimensionales. La mayoría de los láseres que se utilizan en visión industrial usan lentes cilíndricas que convierten el haz puntual del láser en un patrón con forma determinada: puntos, círculos, líneas, cruces, etc. (figura C.12). Los láseres van a venir en variedad de longitudes de onda y potencia que dependiendo de ambos factores quedarán clasificados en determinadas clases (II, IIIA, IIIB, etc.).



Figura C.11: Estroboscopios.

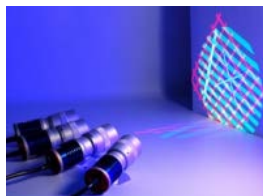


Figura C.12: Láser.

c.2.6 *Fibra óptica.*

La iluminación por fibra óptica representa en la fuente luminosa que proporciona la iluminación más intensa de todos los tipos. La idea básica es conducir la luz, procedente de una fuente con una lámpara halógena o de xenón (figura C.13a), a través de un haz de fibras ópticas que termina en un adaptador o terminador especial según el tipo de aplicación que se requiera. Los terminadores de las fibras pueden ser puntuales, de panel (figura C.13b), anulares (figuras C.13c y C.13d), lineales (figura C.13e), y difusores axiales.



(a) Fuente alimentación.



(b) A contraluz.



(c) Anular (difusa).



(d) Campo oscuro.



(e) Lineal.

Figura C.13: Fibra óptica.

SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

D.1 SIMULACIÓN DE ESCENAS 3D.

La simulación de escenas tridimensionales por computador es una tarea realizada por un motor de renderizado o rénder. Éste en función de las características de las fuentes de luz y los elementos de la escena calcula la iluminación recibida en cada punto considerando tanto la iluminación directa, generada por las fuentes de luz, como la iluminación indirecta, provocada por las reflexiones entre las superficies iluminadas, representando la escena 3D de una forma lo más real posible. El motor de rénder que ha usado la aplicación DIALux para la simulación se denomina RADical fundamentado en la tesis doctoral de Bernard Kwok [429].

Existen una serie de técnicas computacionales que permiten calcular las interacciones lumínicas entre objetos y superficies de forma realista. Este conjunto de técnicas quedan englobadas dentro de lo que se conoce comúnmente como la *Iluminación Global*. Debido a la complejidad de los cálculos cada una de estas técnicas busca aproximar un comportamiento concreto de la luz. Las técnicas más conocidas son el trazado de rayos (ray tracing) y la radiosidad (radiosity) entre otros [430, 431].

La técnica de *ray tracing* modela las interacciones especulares perfectas entre objetos y superficies basándose para ello en el concepto de reflexión especular. Este método supone que la interacción lumínica entre objetos se reduce exclusivamente a reflexiones especulares sin producirse nunca reflexión difusa. Así, toda la energía que llega a un objeto es reflejada en una única reflexión con la excepción de la que es absorbida por el material del objeto. Mediante esta técnica se simula de forma muy realista efectos ópticos como las luces cáusticas o reflexiones entre objetos (tipo metal pulido o espejos).

La técnica de la *radiosidad* es complementaria al ray tracing. En este caso se tratan reflexiones difusas ideales de forma que no pueden simularse efectos ópticos como el de un espejo. Por el contrario, resulta ser una técnica con resultados muy reales sobre la representación de la iluminación global de una escena. Los algoritmos de radiosidad suponen superficies mate que no producen reflexiones especulares en las que toda la energía que incide sobre el material es reflejada por igual en todas las direcciones salvo la absorbida por el mismo. La gran ventaja de esta técnica es la gran calidad de los resultados frente al inconveniente de tener un excesivo cálculo computacional.

D.1.1 *Algoritmo de la radiosidad.*

Aunque el algoritmo básico del cálculo de la radiosidad viene completamente desarrollado en [432] a continuación se describe brevemente la claves principales del mismo.

La radiosidad se define como la energía emitida por una superficie por unidad de área de superficie y por unidad de tiempo. Esta energía es la suma de la energía emitida por la superficie (bien por luz directa, bien por fuente de luz) y la energía reflejada por la superficie considerada proveniente de otras superficies.

Considerando una superficie A_j la radiosidad B_j de la superficie, medida en w/m^2 , será:

$$B_j = M_j + \rho_j \cdot E_j \quad (\text{D.1})$$

donde M_j es la emitancia generada por la propia superficie A_j y ρ_j es la reflectividad la superficie que representa la fracción de la irradiancia E_j que es reflejada por la superficie.

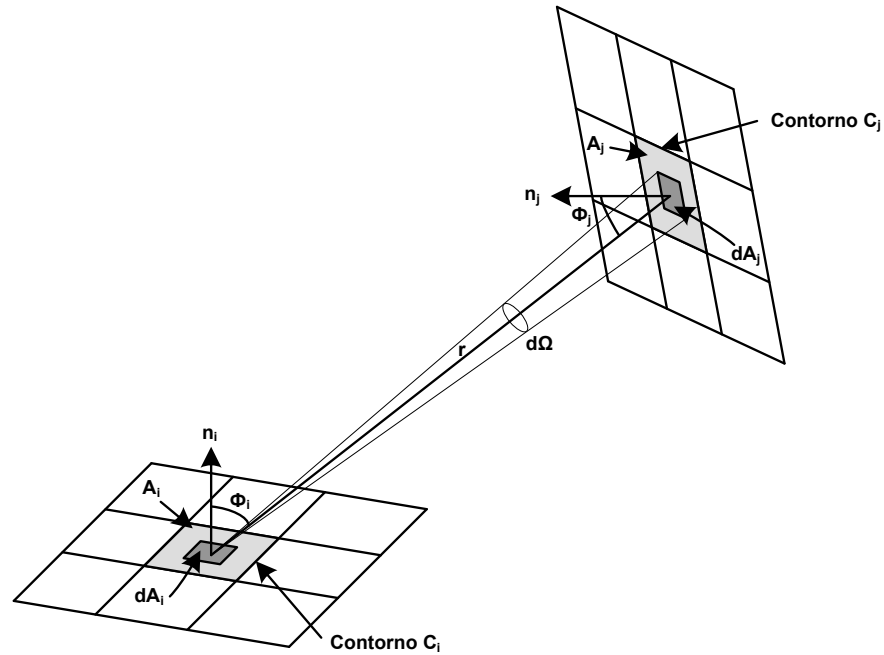


Figura D.1: Radiosidad y geometría del factor de forma.

Dadas dos superficies A_j y A_i en el espacio (Figura D.1), la irradiancia E_j considerada será el producto del valor de la radiosidad de la superficie A_i , denominado B_i , y un determinado factor de forma F_{ij} existente entre ambas superficies. Este factor de forma representa la fracción de la energía radiante que deja la superficie A_i y que incide sobre la superficie A_j .

$$E_j = B_i \cdot F_{ij} \quad (D.2)$$

El factor de forma F_{ij} entre dos superficies A_i y A_j separadas una distancia r será:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cdot \cos \phi_j}{\pi r^2} \cdot dA_i dA_j \quad (D.3)$$

siendo ϕ_i y ϕ_j los ángulos formados entre los vectores normales a las superficies (n_i y n_j) y la dirección de separación de las superficies.

Sustituyendo la ecuación D.2 en D.1 se obtiene la ecuación D.4 que representa el cálculo de la radiosidad de una superficie A_j considerando la interacción de una única superficie A_i .

$$B_j = M_j + \rho_j \cdot [B_i \cdot F_{ij}] \quad (D.4)$$

Generalizando el cálculo de la radiosidad B_j para un valor n de superficies que interaccionan con la superficie A_j se obtiene:

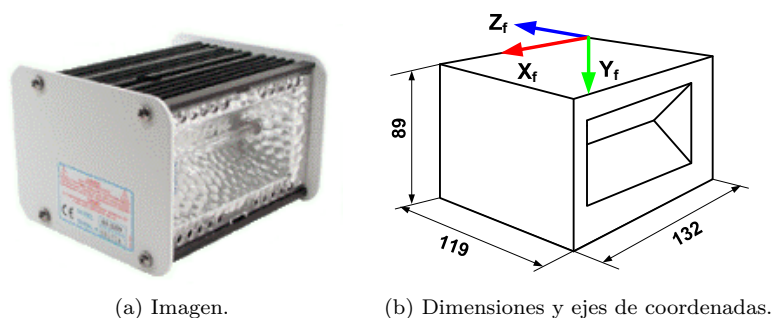
$$B_j = M_j + \rho_j \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot F_{ij} \quad (D.5)$$

El valor de n representará el número de superficies en que se divide la escena 3D para realizar el cálculo considerando todos los elementos individuales de superficie. Teniendo esto en cuenta se tiene la siguiente ecuación matricial de la radiosidad:

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 \cdot F_{11} & -\rho_1 \cdot F_{12} & \cdots & -\rho_1 \cdot F_{1n} \\ -\rho_2 \cdot F_{21} & 1 - \rho_2 \cdot F_{22} & \cdots & -\rho_2 \cdot F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\rho_n \cdot F_{n1} & -\rho_n \cdot F_{n2} & \cdots & 1 - \rho_n \cdot F_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (D.6)$$

D.2 DATOS FOTOMÉTRICOS DE LOS PROYECTORES ESTROBOSCÓPICOS.

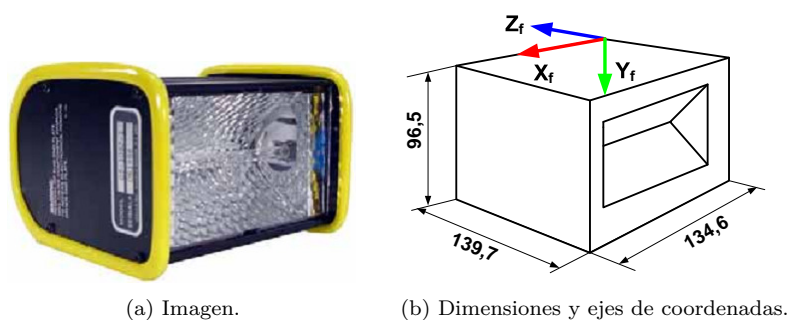
Los datos fotométricos de los proyectores estroboscópicos han sido extraídos de los manuales de operación del fabricante de los proyectores [433, 434]. Los modelos de proyectores que se han simulado son el Cricket (figura D.2) y el Lith-o-light-5 (figura D.3) de Unilux Inc.



(a) Imagen.

(b) Dimensiones y ejes de coordenadas.

Figura D.2: Proyector Cricket.



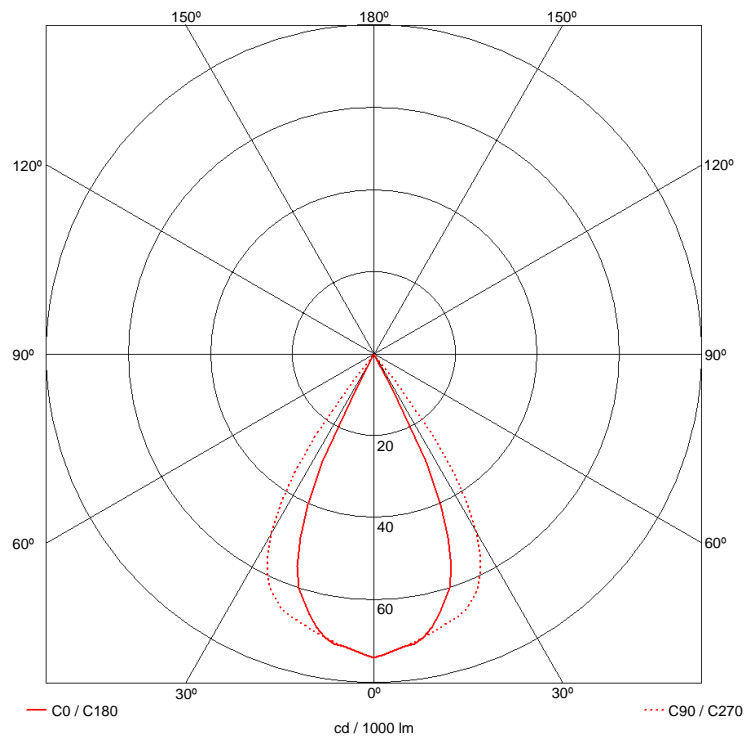
(a) Imagen.

(b) Dimensiones y ejes de coordenadas.

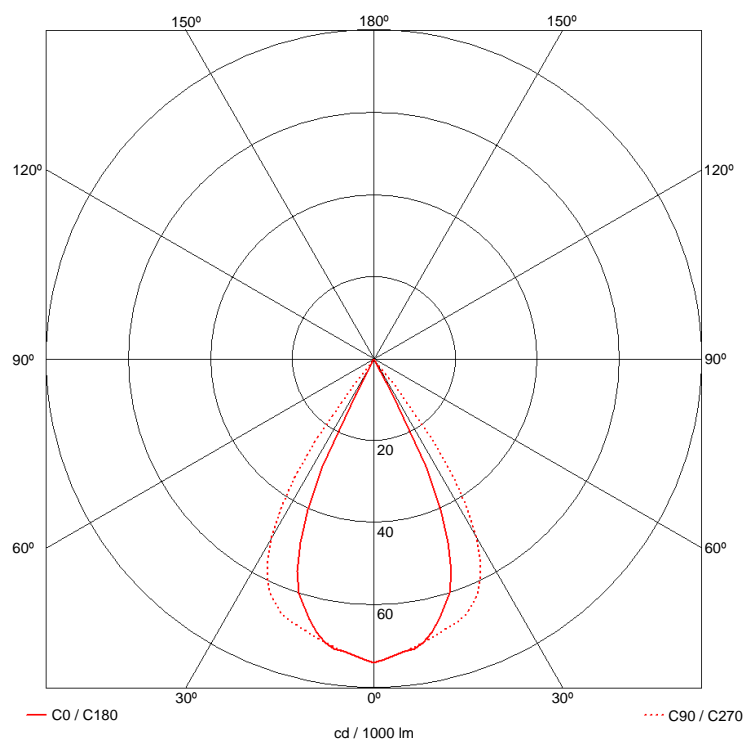
Figura D.3: Proyector Lith-o-light-5.

La figura D.4 muestra los diagramas polares de ambos proyectores según los planos de referencia $C0^\circ$ - $C180^\circ$ y $C90^\circ$ - $C270^\circ$ de la luminaria y el ángulo de giro γ sobre el plano C en el que se radia la intensidad lumínica. Los valores de intensidad lumínica vienen dados en candelas respecto a un flujo luminoso de 1000 lúmenes.

Los datos del diagrama polar de los proyectores han sido importados por la aplicación DIALux a través un tipo específico de formato de fichero denominado Eulumdat ldc. Para poder crear correctamente el formato de fichero con los datos del fabricante del proyector se ha usado la aplicación LumEdit [435].



(a) Cricket.



(b) Lith-o-light-5.

Figura D.4: Diagramas polares proyectores estroboscópicos (Unilux Inc.).

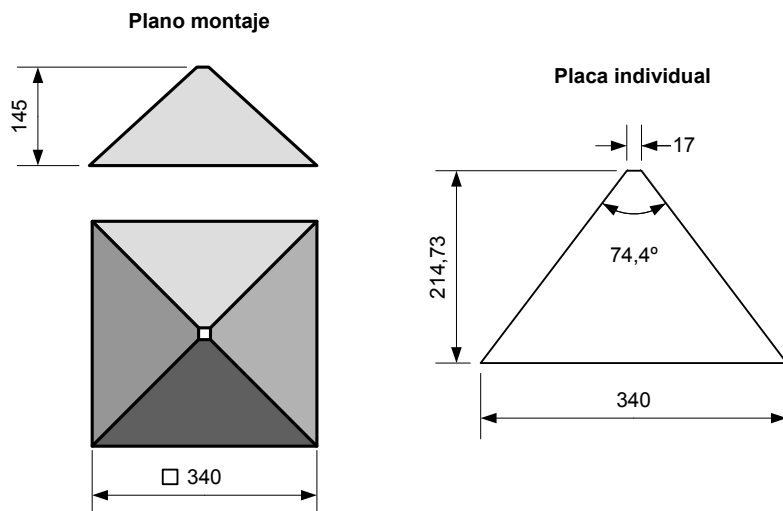


Figura D.5: Planos de montaje y placa individual de la pirámide difusora.

D.3 DATOS PARA LA SIMULACIÓN.

Los datos de partida que necesita la aplicación DiaLUX para poder realizar las simulaciones son las dimensiones de la caja difusora y reflectividad de las paredes internas, dimensiones de los proyectores estroboscópicos, su ubicación dentro de la caja y sus datos fotométricos, las dimensiones, características y ubicación de la pirámide difusora de policarbonato blanco opal translúcido y, por último, la ubicación de la superficie sobre la que se desea calcular la iluminancia.

D.3.1 Características de la pirámide difusora.

La pirámide difusora está contruida a partir de cuatro placas de policarbonato unidas por un adhesivo (figura D.5). El policarbonato es un material translúcido perteneciente a los termoplásticos formado a partir de grupos de carbonato. Se trata de un material bastante económico, que puede trabajar en condiciones de operación extremas, de gran resistencia mecánica, fácil mantenimiento y, sobre todo, con una alta transmisión de la luz en forma difusa y uniforme lo que le confiere como un material ideal cuando se requiere una iluminación que evite zonas de sombra.

El índice de refracción del policarbonato es de 1,585 con una transmisión de la luz, para una placa de 2 mm de policarbonato blanco opal, de un 85 %. Los valores de las dimensiones dadas en la figura D.5 vienen dadas en milímetros.

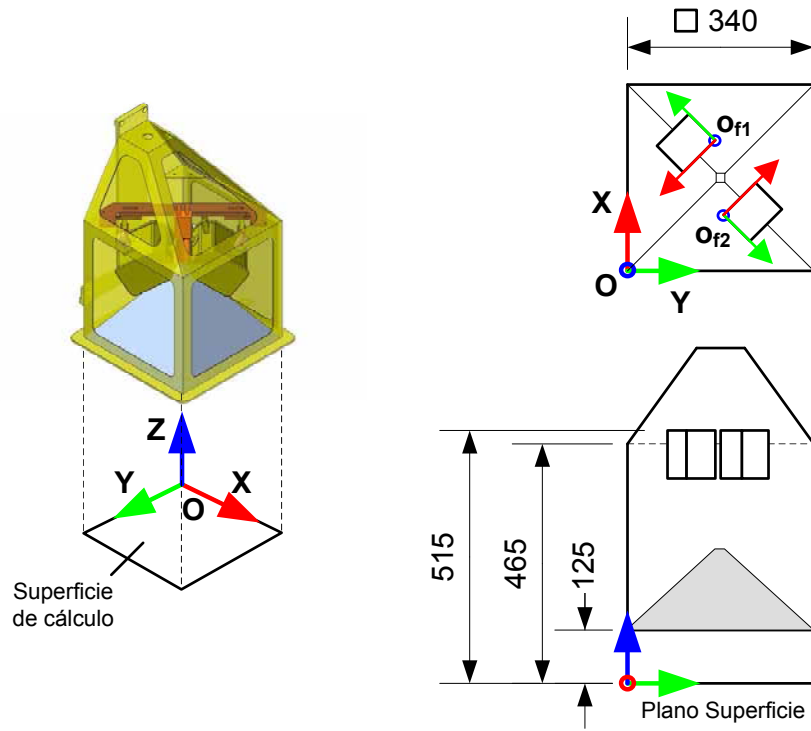


Figura D.6: Ubicación proyectores y superficie de cálculo (dimensiones en mm).

D.3.2 Características de la caja difusora y ubicación de proyectores.

Como se muestra en la figura D.6, la pirámide difusora queda encajada en la parte inferior de la caja difusora. Los proyectores estroboscópicos, ubicados en el interior de la caja, se fijan en la parte superior de la misma sobre una de las diagonales de la caja. La superficie sobre la que se calcula la iluminancia, resultado de la simulación, se encuentra justamente debajo de la caja.

Sobre esta superficie se fija el origen de coordenadas O del sistema y sobre éste se define el sistema de coordenadas ortogonales \vec{X} , \vec{Y} y \vec{Z} . Los orígenes de coordenadas de cada proyector también quedan fijados y definidos como O_{f1} y O_{f2} y su sistema de ejes coordenados $(\vec{X}_{fi}, \vec{Y}_{fi}, \vec{Z}_{fi})$ tal y como se mostraron en la figura D.2b. El eje \vec{Z} del sistema de coordenadas tiene la misma dirección y sentido que los ejes \vec{Z}_{fi} de cada uno de los proyectores. Los ángulos de rotación sobre cada uno de los ejes del sistema de coordenadas de cada proyector se definen como α_{fi} para el eje \vec{X}_{fi} , β_{fi} para el eje \vec{Y}_{fi} y γ_{fi} para el eje \vec{Z}_{fi} (se tomará por convención que un giro en sentido horario corresponde con un ángulo positivo).

La posición de cada proyector respecto al origen de coordenadas del sistema y el ángulo de rotación sobre cada eje en el sistema coordenado de cada proyector viene definido en la tabla D.1.

	O_{f1}	O_{f2}
x_{fi}	165	175
y_{fi}	235	114
z_{fi}	515	515
α_{fi}	0°	0°
β_{fi}	0°	0°
γ_{fi}	-135°	45°
Nota: coordenadas en milímetros.		

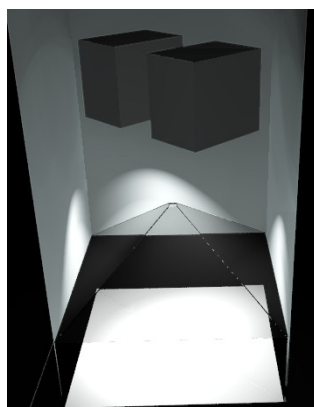
Tabla D.1: Posición de los proyectores estroboscópicos en interior de caja.

Como se comentó con anterioridad, las paredes interiores de la caja difusora están recubiertas por una capa de pintura blanca mate. El grado de reflexión de las paredes que se ha usado para la simulación se ha fijado en un 86 %.

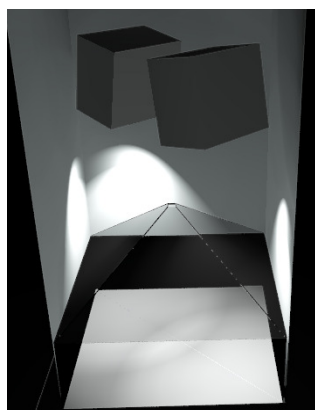
D.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.

Una vez introducidos todos los datos dimensionales y características de los elementos en la aplicación DIALux se ha procedido a simular el sistema obteniendo la iluminancia sobre la superficie de cálculo. Los resultados vienen expresados en lux y en dos formatos distintos: en forma de gama de grises y en forma tabular (según una rejilla de cálculo de 11 x 11 celdas).

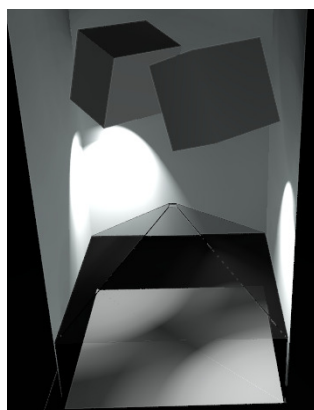
Se han realizado simulaciones exclusivamente para las siguientes rotaciones sobre el ángulo α_{fi} tanto para el modelo de proyector Cricket (figuras [D.9](#), [D.10](#), [D.11](#), [D.12](#), [D.13](#), [D.14](#) y [D.15](#)) como para el modelo Lith-o-light-5 (figuras [D.16](#), [D.17](#), [D.18](#), [D.19](#), [D.20](#), [D.21](#) y [D.22](#)): 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° y 60° (el mismo ángulo de rotación para los dos proyectores). Los valores subrayados en los resultados mostrados en el formato tabla corresponden a los valores máximos y mínimos. Las figuras [D.7](#) y [D.8](#) muestran las infografías obtenidas para cada una de las simulaciones de los modelos de proyectores Cricket y Lith-o-Light-5 respectivamente.



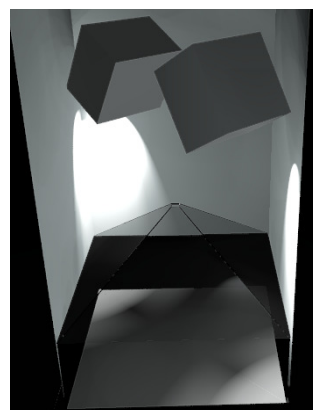
(a) $\alpha = 0^\circ$.



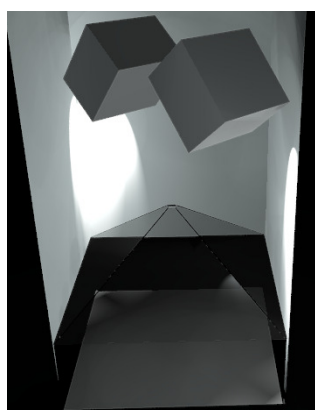
(b) $\alpha = 10^\circ$.



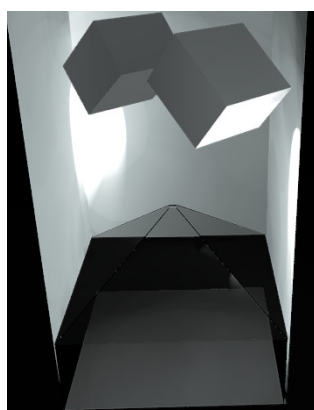
(c) $\alpha = 20^\circ$.



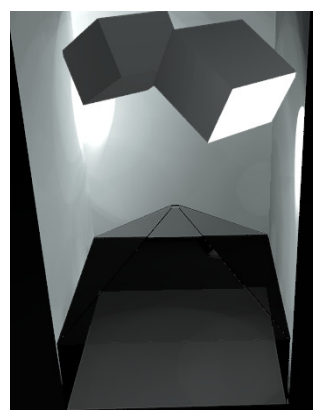
(d) $\alpha = 30^\circ$.



(e) $\alpha = 40^\circ$.

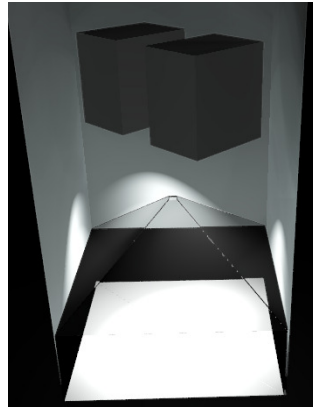


(f) $\alpha = 50^\circ$.

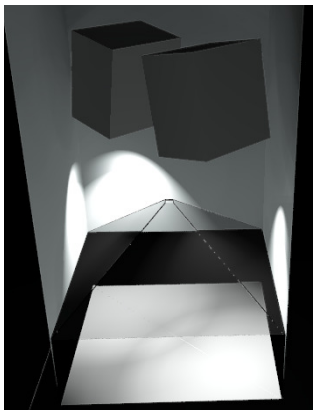


(g) $\alpha = 60^\circ$.

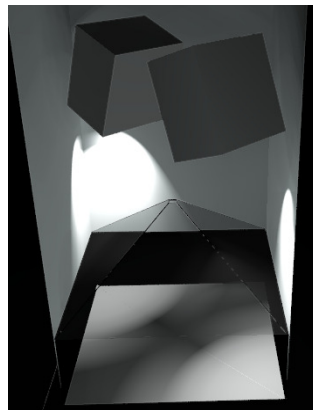
Figura D.7: Infografías proyector Cricket. Rotaciones sobre eje X_{fi} .



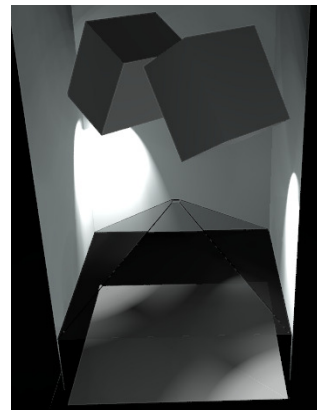
(a) $\alpha = 0^\circ$.



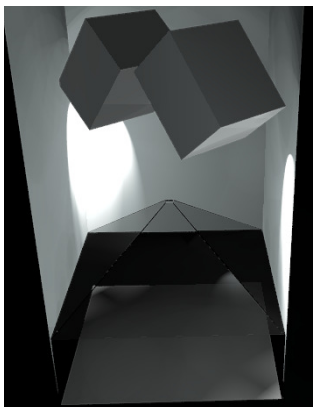
(b) $\alpha = 10^\circ$.



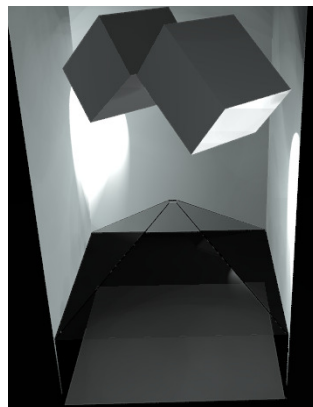
(c) $\alpha = 20^\circ$.



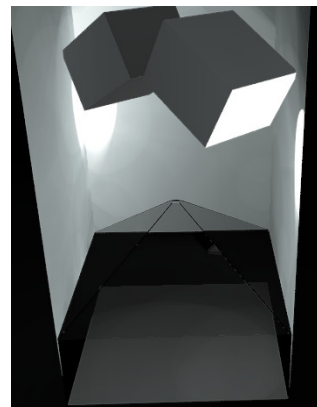
(d) $\alpha = 30^\circ$.



(e) $\alpha = 40^\circ$.

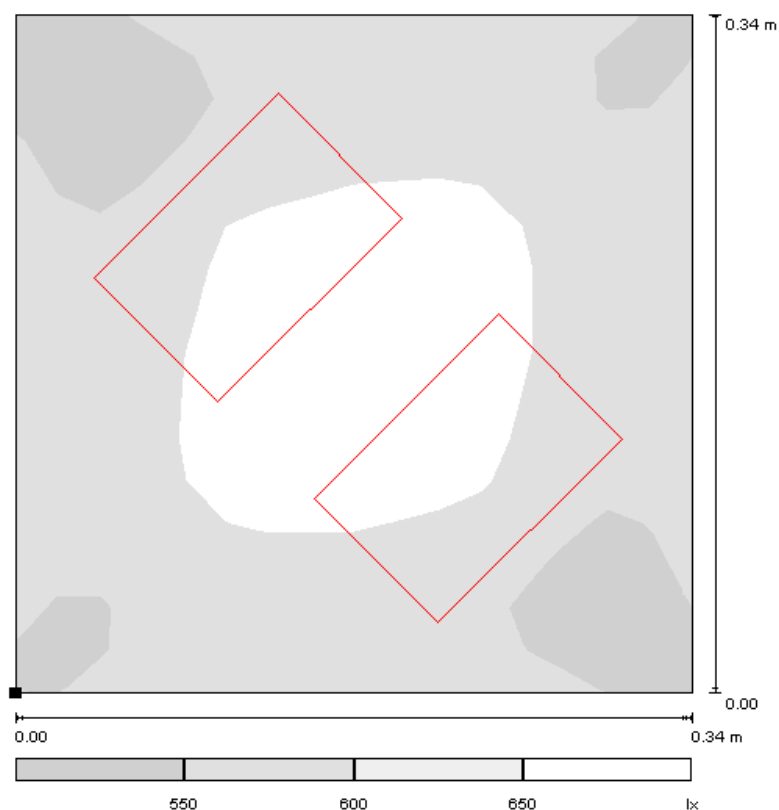


(f) $\alpha = 50^\circ$.



(g) $\alpha = 60^\circ$.

Figura D.8: Infografías proyector Lith-o-Light-5. Rotaciones sobre eje X_{fi} .

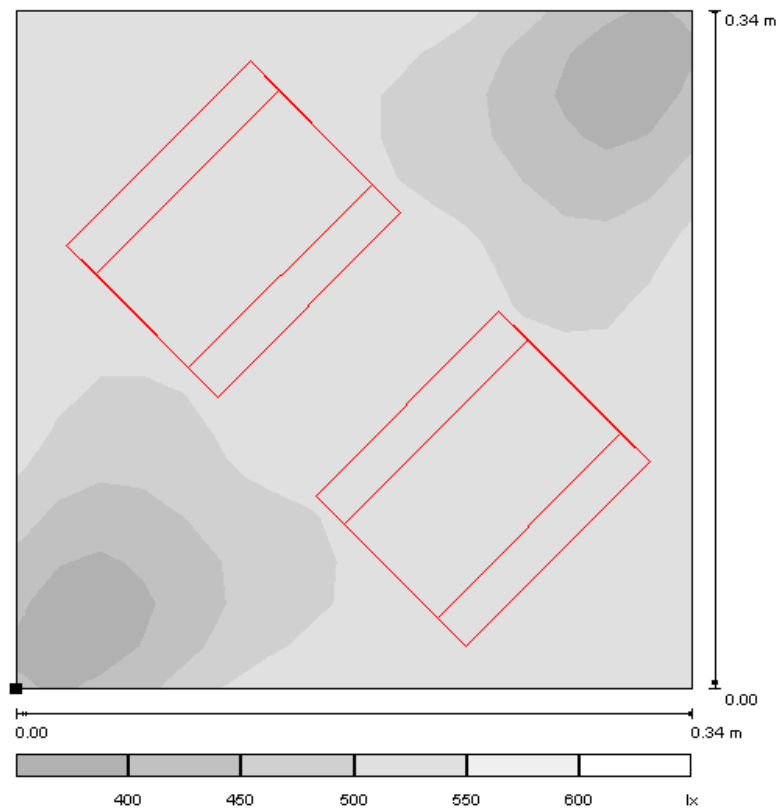


(a) Gama de grises.

461	493	512	543	551	566	571	581	549	524	482
494	518	526	563	585	604	607	609	580	556	526
510	526	555	607	627	642	643	641	610	582	553
544	563	607	664	676	684	683	683	642	612	589
551	585	627	676	680	688	685	685	645	612	580
566	604	642	684	688	<u>694</u>	690	686	646	608	572
571	607	643	683	685	690	684	681	637	597	560
581	609	641	683	685	686	681	671	621	576	549
549	580	610	642	645	646	636	620	569	533	518
524	556	582	612	612	608	597	576	533	525	502
482	526	553	589	580	572	560	549	518	502	472

(b) Tabla.

Figura D.9: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 0^\circ$). Modelo Cricket.

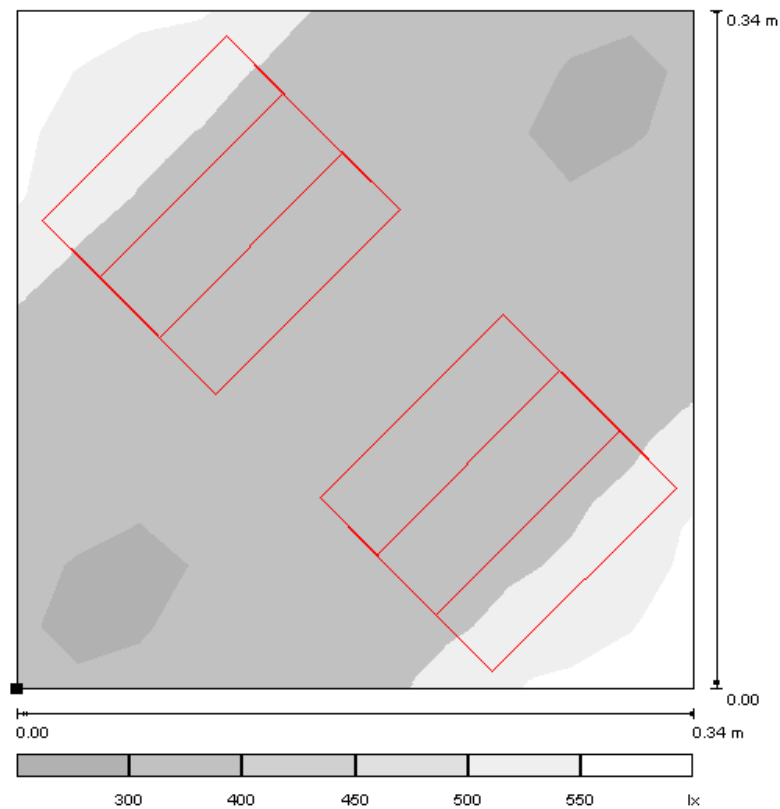


(a) Gama de grises.

520	541	539	548	524	500	484	456	406	370	<u>340</u>
541	555	550	550	523	503	488	461	412	385	369
539	550	544	546	519	505	491	466	427	410	404
548	550	546	<u>559</u>	527	509	510	505	463	456	455
524	523	519	527	503	520	524	513	486	485	483
500	503	505	509	519	536	521	514	513	515	511
483	488	491	510	523	521	511	523	521	524	523
456	461	466	505	513	514	523	554	546	550	547
406	412	427	463	486	513	521	546	543	550	542
370	385	410	456	485	515	524	550	550	556	544
<u>340</u>	369	404	455	483	511	523	546	542	544	524

(b) Tabla.

Figura D.10: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 10^\circ$). Modelo Cricket.

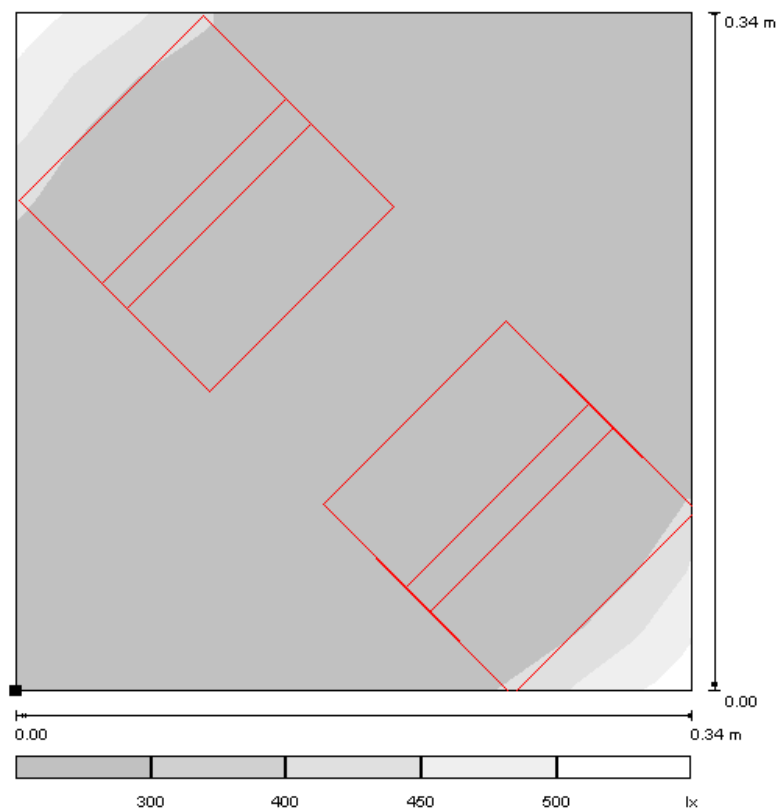


(a) Gama de grises.

521	<u>528</u>	517	511	470	414	380	342	300	285	275
<u>528</u>	522	511	493	439	381	353	324	291	283	284
516	510	496	472	408	347	331	314	288	289	297
511	493	472	462	370	336	335	331	309	319	341
470	439	408	370	324	322	322	332	325	341	373
414	381	347	336	322	323	323	339	356	396	426
380	353	331	335	322	323	325	355	395	429	463
342	324	314	331	332	339	355	433	462	487	506
300	291	288	309	325	356	395	462	490	504	514
285	283	289	319	341	396	429	487	504	518	<u>528</u>
<u>274</u>	284	297	341	373	426	463	506	514	<u>528</u>	523

(b) Tabla.

Figura D.11: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 20^\circ$). Modelo Cricket.

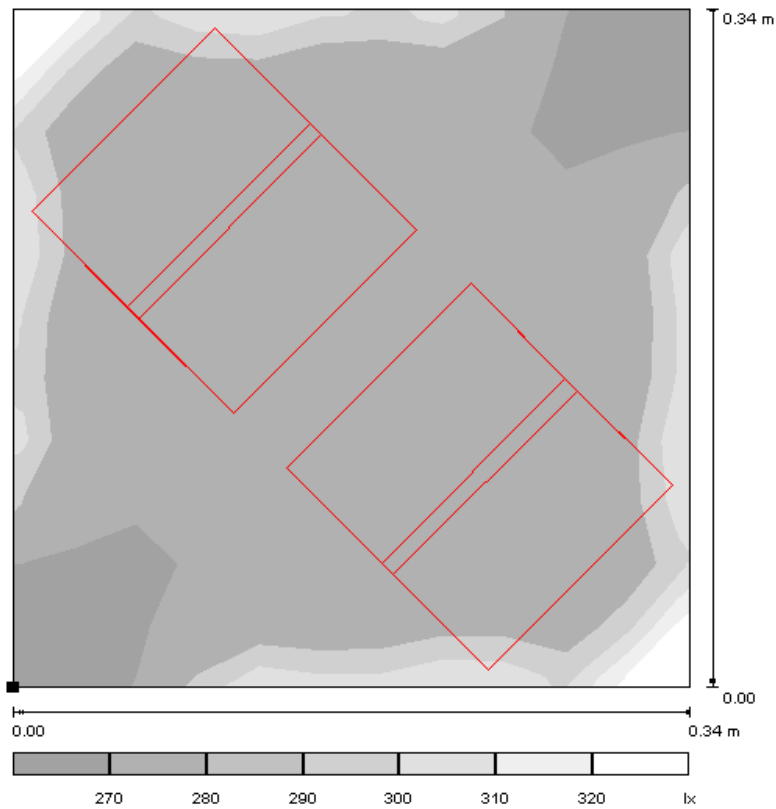


(a) Gama de grises.

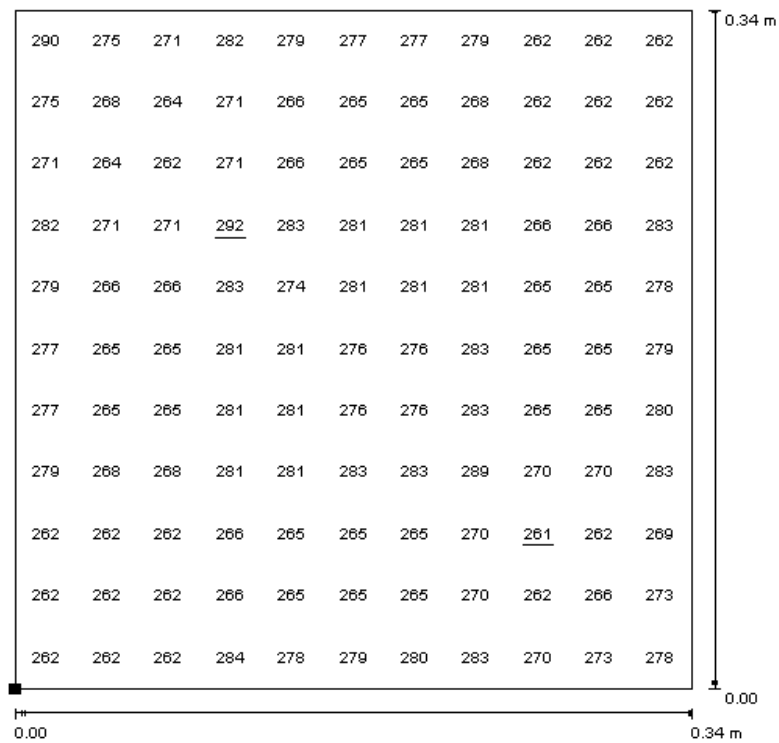
<u>452</u>	431	392	348	314	298	288	289	265	283	280
431	398	341	315	295	284	281	280	265	278	286
391	341	307	307	287	281	281	280	<u>260</u>	267	267
348	315	307	320	303	300	300	303	279	279	292
314	295	287	303	293	295	295	299	279	279	289
298	284	281	300	295	296	296	303	283	286	301
288	281	281	300	295	296	296	303	285	293	311
287	280	280	303	299	303	303	315	304	311	338
266	265	<u>260</u>	280	279	283	285	304	301	322	377
283	278	266	280	279	286	293	311	322	381	421
279	285	267	293	289	301	311	338	377	421	449

(b) Tabla.

Figura D.12: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 30^\circ$). Modelo Cricket.

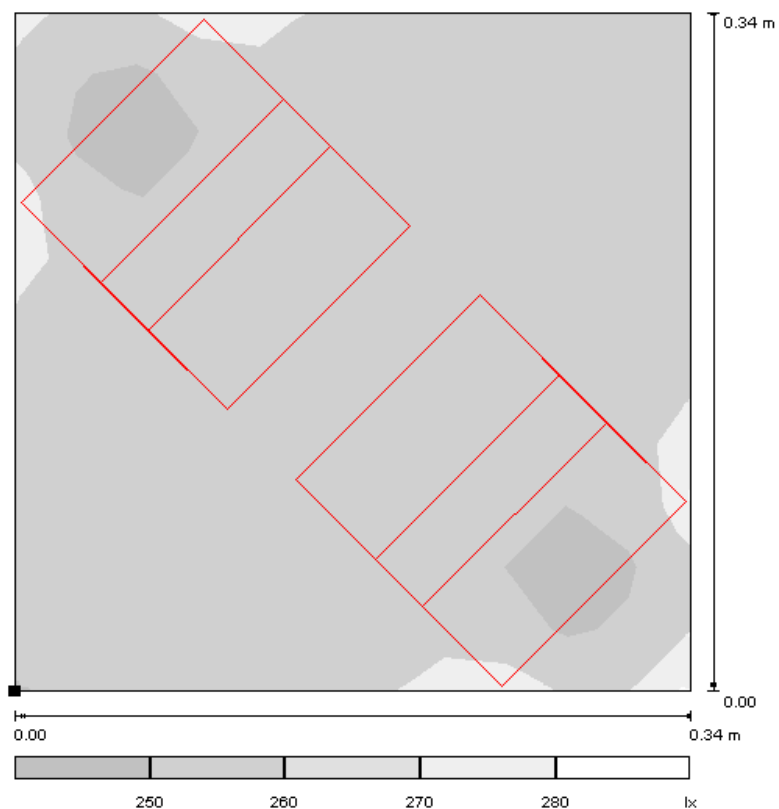


(a) Gama de grises.

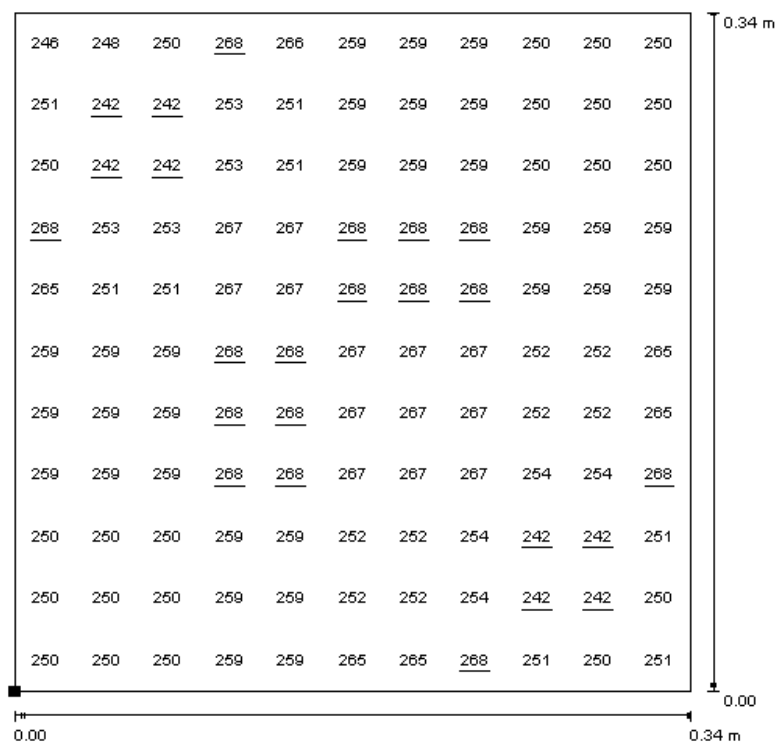


(b) Tabla.

Figura D.13: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 40^\circ$). Modelo Cricket.

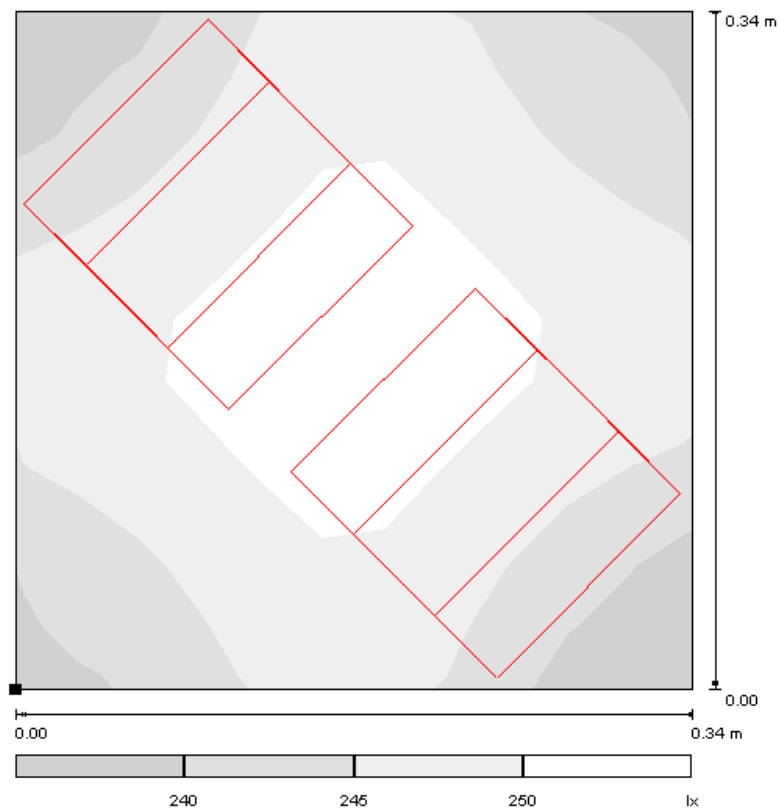


(a) Gama de grises.

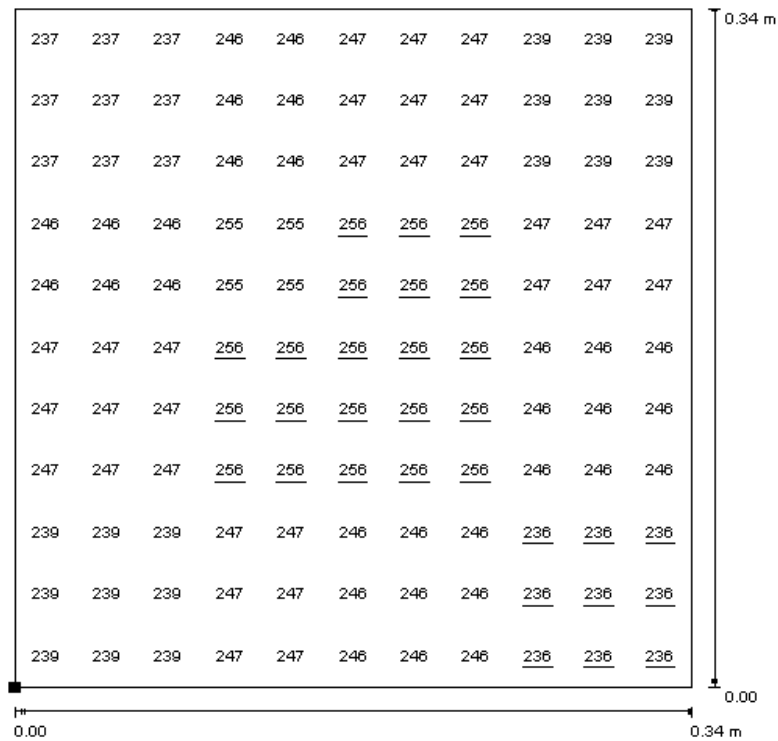


(b) Tabla.

Figura D.14: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 50^\circ$). Modelo Cricket.

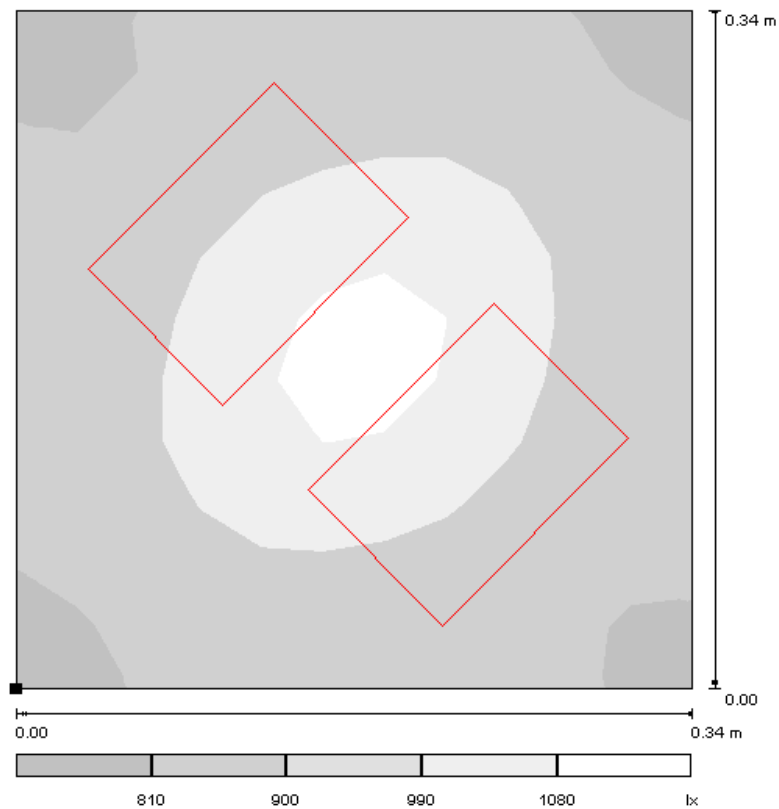


(a) Gama de grises.



(b) Tabla.

Figura D.15: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 60^\circ$). Modelo Cricket.



(a) Gama de grises.

696	765	798	848	849	861	865	873	819	768	699
765	799	821	862	895	927	935	938	883	832	770
798	821	839	935	979	1002	1002	997	940	888	825
848	862	935	1033	1061	1079	1073	1067	1002	947	884
849	895	979	1061	1076	1094	1085	1077	1010	947	880
861	927	1002	1079	1094	<u>1103</u>	1097	1085	1011	938	866
865	935	1002	1073	1085	1097	1083	1075	996	917	858
873	938	997	1067	1077	1085	1075	1049	959	884	857
819	883	940	1002	1010	1011	996	959	862	833	810
768	832	887	947	947	938	917	884	833	811	778
698	770	825	885	880	866	858	856	810	778	719

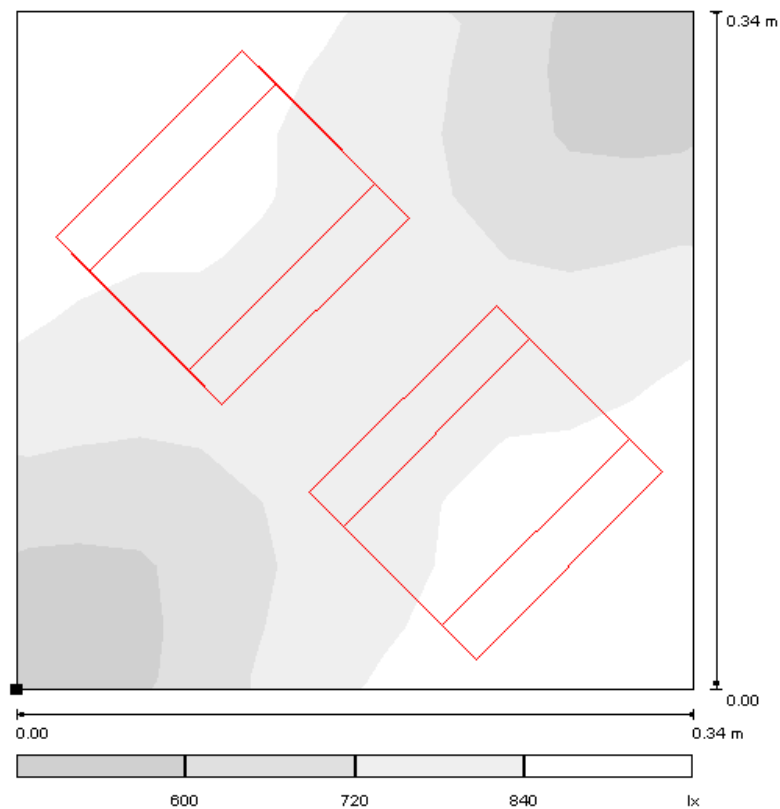
0.34 m

0.00

0.00 0.34 m

(b) Tabla.

Figura D.16: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 0^\circ$). Modelo LoL5.

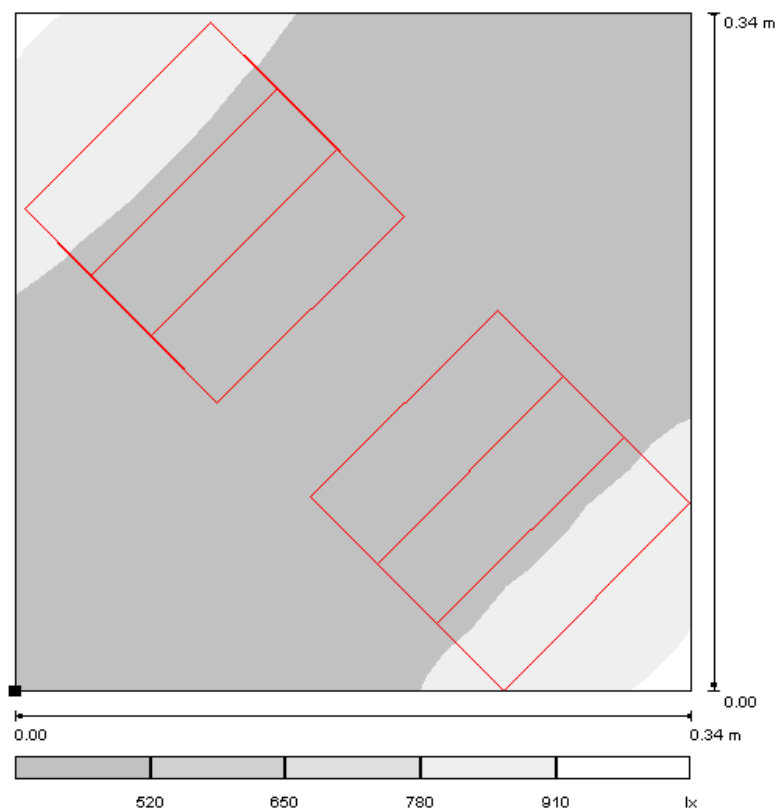


(a) Gama de grises.

828	862	858	865	823	779	741	678	577	531	<u>471</u>
862	890	879	874	822	781	753	690	593	567	531
858	879	870	868	818	782	751	689	602	591	575
865	874	868	871	820	784	751	725	676	681	674
823	822	818	820	752	763	774	753	741	743	737
779	781	782	784	763	773	761	798	799	804	797
741	753	751	751	774	761	743	813	816	822	822
678	690	689	725	753	798	813	861	866	874	865
577	593	602	676	741	799	816	866	870	879	862
530	567	591	681	743	804	822	874	879	894	868
<u>471</u>	531	575	674	737	797	822	864	862	868	834

(b) Tabla.

Figura D.17: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 10^\circ$). Modelo LoL5.



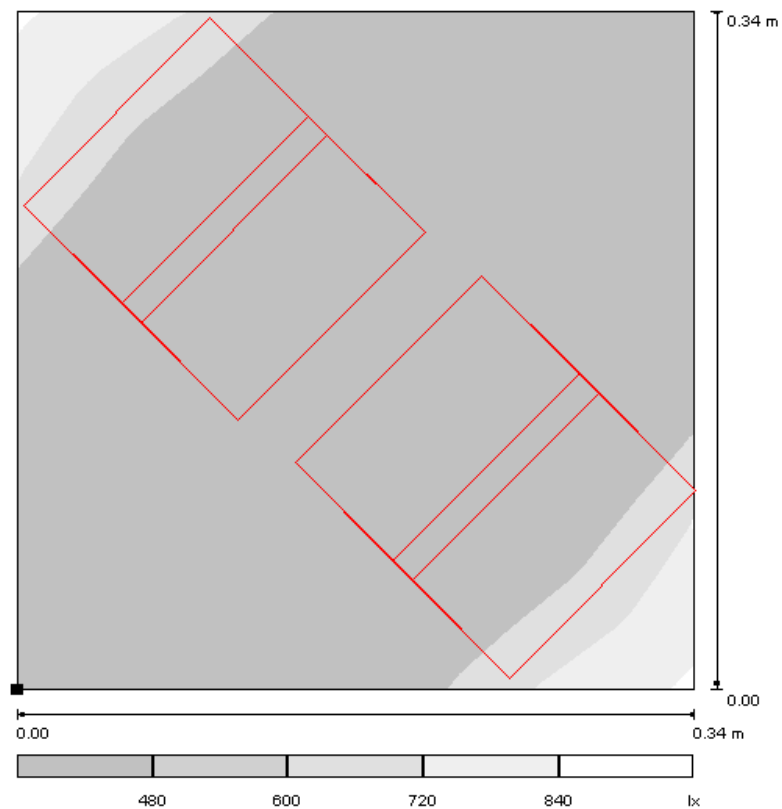
(a) Gama de grises.

828	844	817	799	718	608	546	511	436	423	411
844	836	807	774	676	556	524	486	430	430	425
817	807	772	724	606	510	502	469	430	430	433
800	774	724	656	527	508	504	489	462	478	505
718	676	606	527	477	482	482	498	494	515	541
608	556	510	508	482	480	485	515	520	582	634
546	524	502	504	482	485	480	512	581	654	706
510	487	470	489	498	515	512	621	707	759	793
436	430	430	462	494	520	581	707	762	798	813
423	430	430	478	515	582	654	759	798	826	841
411	425	432	505	541	634	705	792	813	841	831

Diagram (b) shows a table of illuminance values (lx) on a 0.34 m x 0.34 m surface. The table is a 11x11 grid of values. The vertical axis is labeled 0.00 at the bottom and 0.34 m at the top. The horizontal axis is labeled 0.00 at the left and 0.34 m at the right.

(b) Tabla.

Figura D.18: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 20^\circ$). Modelo LoL5.



(a) Gama de grises.

739	719	659	575	505	469	446	440	411	415	411
719	653	580	503	471	447	438	435	412	412	416
659	580	470	484	454	438	438	435	412	412	413
575	503	484	494	472	466	466	466	433	433	442
505	471	454	472	458	458	458	454	436	436	448
470	447	439	466	459	462	462	472	447	460	488
447	439	439	466	459	462	462	472	454	470	502
441	435	435	467	464	472	472	491	481	499	573
413	413	413	434	437	447	456	486	473	573	657
416	413	413	434	437	461	474	505	573	650	716
474	418	415	444	446	487	505	565	654	714	740

Diagram (b) shows a table of luminance values (lx) for a square surface. The vertical axis is labeled 0.00 at the bottom and 0.34 m at the top. The horizontal axis is labeled 0.00 on the left and 0.34 m on the right.

(b) Tabla.

Figura D.19: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 30^\circ$). Modelo LoL5.

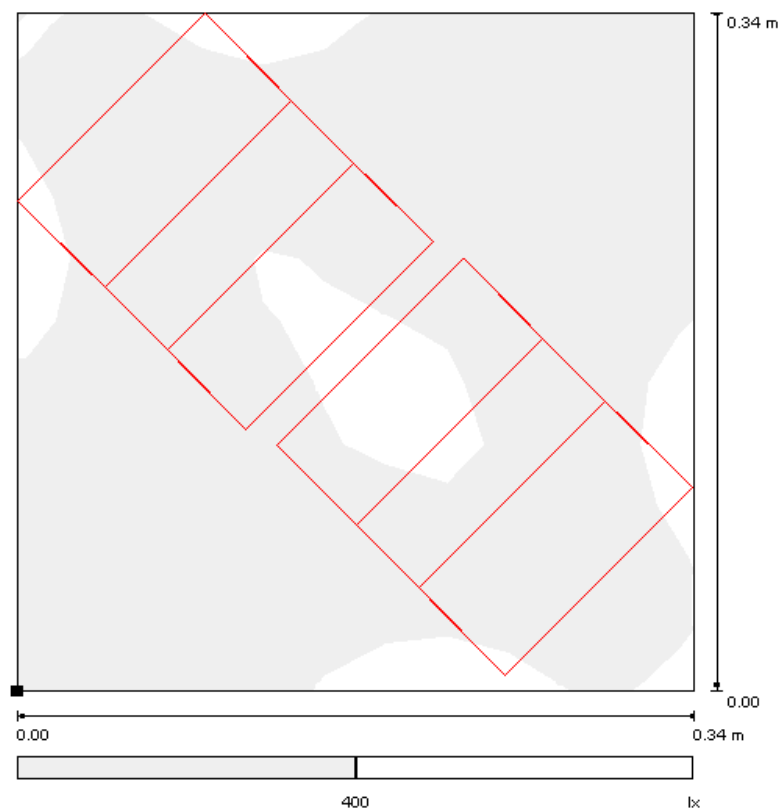


(a) Gama de grises.

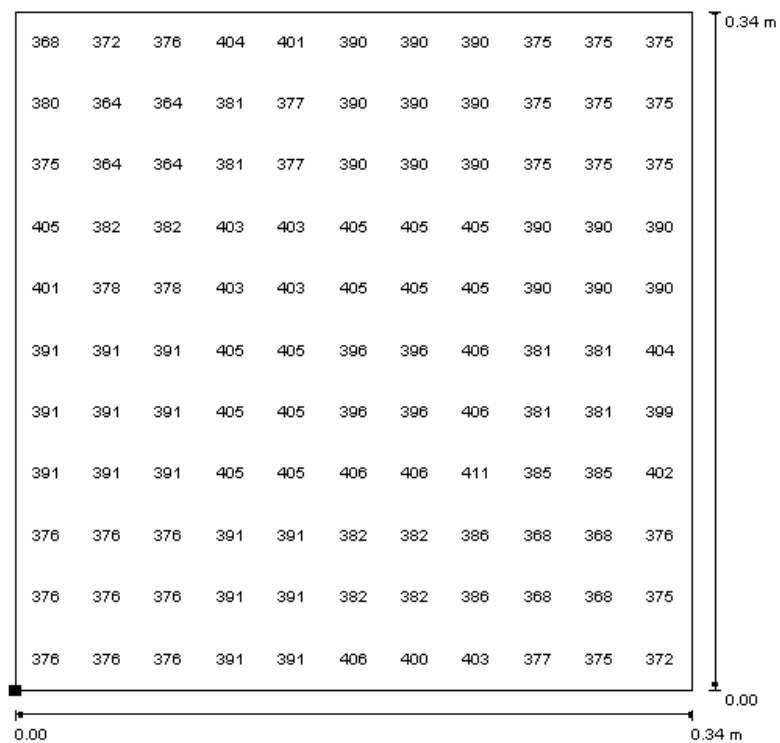
440	413	415	435	423	423	422	422	400	400	400
414	407	410	421	408	406	406	408	400	400	400
415	410	407	421	408	406	406	405	400	400	400
436	419	419	450	435	433	433	443	405	408	425
426	410	410	438	423	425	425	433	405	405	424
422	407	407	433	423	426	426	435	408	408	419
422	407	407	433	423	426	426	435	408	408	425
418	406	401	445	434	439	439	447	420	420	437
401	401	401	404	409	410	410	421	405	407	411
401	401	401	406	409	410	410	421	408	407	409
401	401	401	421	425	419	423	434	415	415	434

(b) Tabla.

Figura D.20: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 40^\circ$). Modelo LoL5.

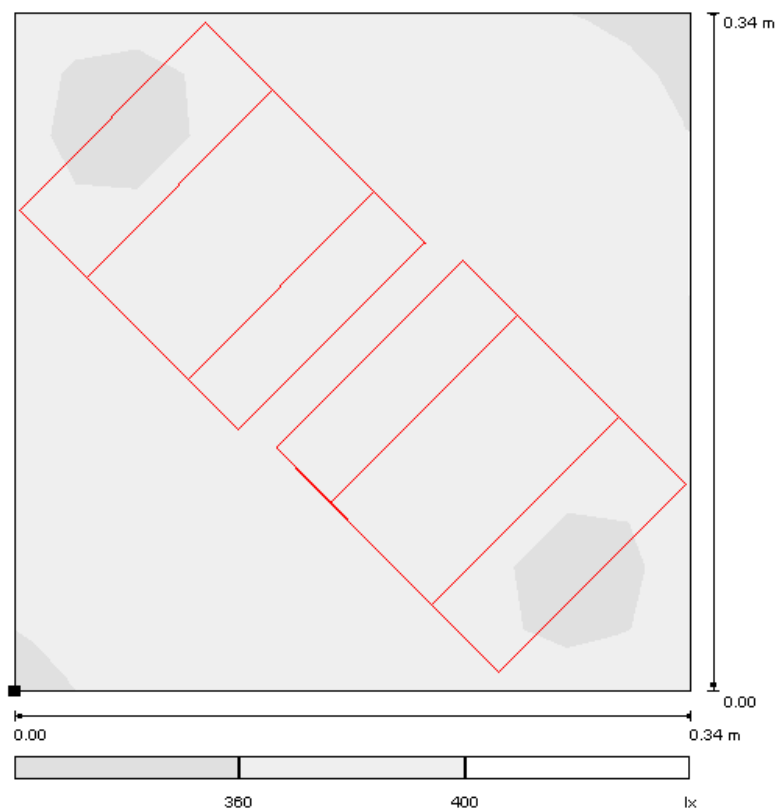


(a) Gama de grises.



(b) Tabla.

Figura D.21: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 50^\circ$). Modelo LoL5.



(a) Gama de grises.

350	349	388	369	369	370	370	370	358	358	358
349	351	351	369	369	370	370	370	358	358	358
388	351	351	369	369	370	370	370	358	358	358
369	369	369	382	382	384	384	384	370	370	370
369	369	369	382	382	384	384	384	370	370	370
371	371	371	384	384	382	382	382	369	369	369
371	371	371	384	384	382	382	382	369	369	369
371	371	371	384	384	382	382	382	369	369	369
359	359	359	371	371	369	369	369	350	350	393
359	359	359	371	371	369	369	369	350	350	361
359	359	359	371	371	369	369	369	392	357	354

(b) Tabla.

Figura D.22: Iluminancia sobre superficie de cálculo ($\alpha = 60^\circ$). Modelo LoL5.

CURVA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL TIPIFICADA

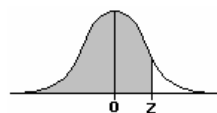


TABLA I (B)
DISTRIBUCIÓN NORMAL TIPIFICADA $N(0, 1)$

La tabla proporciona, para cada valor de z , el área que queda a su izquierda.

z	0'00	0'01	0'02	0'03	0'04	0'05	0'06	0'07	0'08	0'09
0'0	0'50000	0'50399	0'50798	0'51197	0'51595	0'51994	0'52392	0'52790	0'53188	0'53586
0'1	0'53983	0'54380	0'54766	0'55172	0'55567	0'55962	0'56356	0'56749	0'57142	0'57535
0'2	0'57926	0'58317	0'58706	0'59095	0'59483	0'59871	0'60257	0'60642	0'61026	0'61409
0'3	0'61791	0'62172	0'62552	0'62930	0'63307	0'63683	0'64058	0'64431	0'64803	0'65173
0'4	0'65554	0'65910	0'66276	0'66640	0'67003	0'67364	0'67724	0'68082	0'68439	0'68793
0'5	0'69146	0'69497	0'69847	0'70194	0'70450	0'70884	0'71226	0'71566	0'71904	0'72240
0'6	0'72575	0'72907	0'73237	0'73565	0'73891	0'74215	0'74537	0'74857	0'75175	0'75490
0'7	0'75804	0'76115	0'76424	0'76730	0'77035	0'77337	0'77637	0'77935	0'78230	0'78524
0'8	0'78814	0'79103	0'79389	0'79673	0'79955	0'80234	0'80511	0'80785	0'81075	0'81327
0'9	0'81594	0'81859	0'82121	0'82381	0'82639	0'82894	0'83147	0'83398	0'83646	0'83891
1'0	0'84134	0'84375	0'84614	0'84850	0'85083	0'85313	0'85543	0'85769	0'85993	0'86214
1'1	0'86433	0'86650	0'86864	0'87076	0'87286	0'87493	0'87698	0'87900	0'88100	0'88298
1'2	0'88493	0'88686	0'88877	0'89065	0'89251	0'89435	0'89617	0'89796	0'89973	0'90147
1'3	0'90320	0'90490	0'90658	0'90824	0'90988	0'91149	0'91308	0'91466	0'91621	0'91774
1'4	0'91924	0'92073	0'92220	0'92364	0'92507	0'92647	0'92786	0'92922	0'93056	0'93189
1'5	0'93319	0'93448	0'93574	0'93699	0'93822	0'93943	0'94062	0'94179	0'94295	0'94408
1'6	0'94520	0'94630	0'94738	0'94845	0'94950	0'95053	0'95154	0'95254	0'95352	0'95449
1'7	0'95543	0'95637	0'95728	0'95818	0'95907	0'95994	0'96080	0'96164	0'96246	0'96327
1'8	0'96407	0'96485	0'96562	0'96638	0'96712	0'96784	0'96856	0'96926	0'96995	0'97062
1'9	0'97128	0'97193	0'97257	0'97320	0'97381	0'97441	0'97500	0'97558	0'97615	0'97670
2'0	0'97725	0'97778	0'97831	0'97882	0'97932	0'97982	0'98030	0'98077	0'98124	0'98169
2'1	0'98214	0'98257	0'98300	0'98341	0'98382	0'98422	0'98461	0'98500	0'98537	0'98574
2'2	0'98610	0'98645	0'98679	0'98713	0'98745	0'98778	0'98809	0'98840	0'98870	0'98899
2'3	0'98928	0'98956	0'98983	0'99010	0'99036	0'99061	0'99086	0'99111	0'99134	0'99158
2'4	0'99180	0'99202	0'99224	0'99245	0'99266	0'99286	0'99305	0'99324	0'99343	0'99361
2'5	0'99379	0'99396	0'99413	0'99430	0'99446	0'99461	0'99477	0'99492	0'99506	0'99520
2'6	0'99534	0'99547	0'99560	0'99573	0'99585	0'99598	0'99609	0'99621	0'99632	0'99643
2'7	0'99653	0'99664	0'99674	0'99683	0'99693	0'99702	0'99711	0'99720	0'99728	0'99736
2'8	0'99744	0'99752	0'99760	0'99767	0'99774	0'99781	0'99788	0'99795	0'99801	0'99807
2'9	0'99813	0'99819	0'99825	0'99831	0'99836	0'99841	0'99846	0'99851	0'99856	0'99861
3'0	0'99865	0'99869	0'99873	0'99877	0'99881	0'99885	0'99889	0'99893	0'99896	0'99899
3'1	0'99903	0'99906	0'99909	0'99912	0'99915	0'99918	0'99921	0'99923	0'99926	0'99929
3'2	0'99931	0'99933	0'99936	0'99938	0'99940	0'99942	0'99944	0'99946	0'99948	0'99950
3'3	0'99951	0'99953	0'99955	0'99956	0'99958	0'99959	0'99961	0'99962	0'99964	0'99965
3'4	0'99966	0'99967	0'99968	0'99970	0'99971	0'99972	0'99973	0'99974	0'99975	0'99976
3'5	0'99977	0'99977	0'99978	0'99979	0'99980	0'99981	0'99981	0'99982	0'99983	0'99983
3'6	0'99984	0'99985	0'99985	0'99986	0'99986	0'99987	0'99987	0'99988	0'99988	0'99989
3'7	0'99989	0'99990	0'99990	0'99990	0'99991	0'99991	0'99991	0'99992	0'99992	0'99992
3'8	0'99993	0'99993	0'99993	0'99994	0'99994	0'99994	0'99994	0'99995	0'99995	0'99995
3'9	0'99995	0'99995	0'99996	0'99996	0'99996	0'99996	0'99996	0'99996	0'99997	0'99997
4'0	0'99997	0'99997	0'99997	0'99997	0'99997	0'99997	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998
4'1	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998	0'99998	0'99999	0'99999
4'2	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999
4'3	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999	0'99999
4'4	0'99999	0'99999	0'99999	1'00000	1'00000	1'00000	1'00000	1'00000	1'00000	1'00000

Figura E.1: Tabla distribución normal tipificada.

RESULTADOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS LINEAL Y NEURONAL

El presente apéndice muestra los resultados de los modelos de predicción del umbral empírico origen $[Ue]_{\text{pron}}$ sobre el que se apoya la búsqueda del umbral T en el histograma de la imagen durante la etapa de segmentación.

Los modelos han sido contruídos a partir de una población de 1774 casos o muestras de regiones de interés ROI de imágenes con dimensiones de 52×41 píxeles que contienen óxido residual tanto de aceros inoxidables austeníticos como ferríticos sobre las que se le ha calculado la mediana $[m]_{\text{ROI}}$, la desviación típica $[\sigma]_{\text{ROI}}$, la curtosis $[c]_{\text{ROI}}$ y el sesgo $[s]_{\text{ROI}}$, consideradas las variables independientes del modelo, y el umbral empírico para la segmentación $[Ue]_{\text{real}}$ obtenido empíricamente por un experto, considerado la variable dependiente.

F.1 ÍNDICES PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS.

La comparación del modelo lineal y el neuronal se podría realizar en base a multitud de criterios e índices función del objetivo, exigencia y precisión deseados. La idea es establecer unos índices sencillos e intuitivos que ayuden a seleccionar, con la mayor objetividad posible, el modelo más apropiado.

De esta manera, los índices planteados son los siguientes:

- Error absoluto medio (EAM).
- Error absoluto máximo (EA_{Max}).
- Desviación típica del error absoluto medio (σ_{EAM}).

El error absoluto EA es la diferencia entre la medida exacta y la medida obtenida por el modelo. En nuestro caso será el valor absoluto de la diferencia entre el umbral empírico real $[Ue]_{\text{real}}$ y el umbral empírico pronosticado $[Ue]_{\text{pron}}$. Dada una muestra o caso i el error absoluto será:

$$EA_i = | [Ue_i]_{\text{real}} - [Ue_i]_{\text{pron}} | \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (\text{F.1})$$

Partiendo de la definición del EA, el error absoluto medio EAM es:

$$\text{EAM} = \frac{\sum_{i=1}^n EA_i}{n} \quad (\text{F.2})$$

El error absoluto máximo EA_{Max} es:

$$EA_{Max} = \max(EA_i) \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (F.3)$$

Y la desviación típica del error absoluto medio σ_{EAM} :

$$\sigma_{EAM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EA_i - EAM)^2}{n - 1}} \quad (F.4)$$

F.2 HISTOGRAMAS DE LAS VARIABLES.

A continuación se muestran los histogramas de cada una de las variables independientes y dependiente utilizadas en la construcción de los modelos a partir del número de casos especificados. Sobre los histogramas se ha dibujado la curva normal, la media, la desviación estándar y el número de casos N.

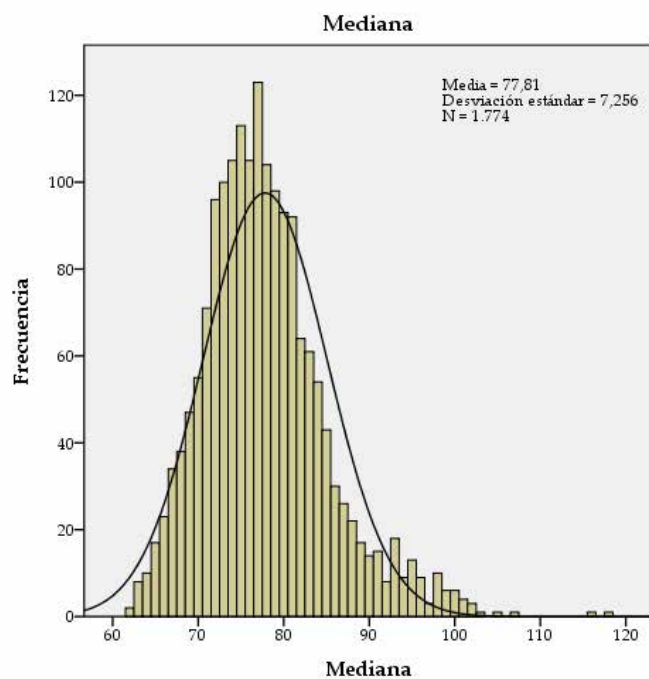
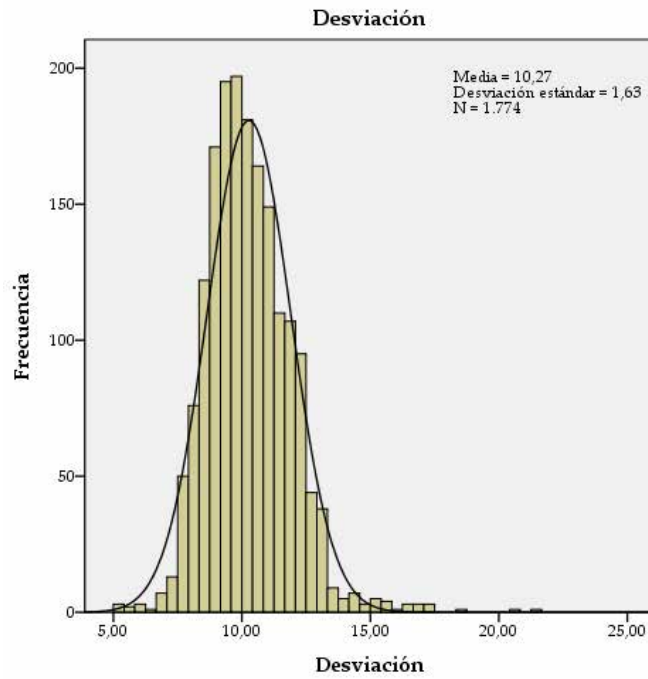
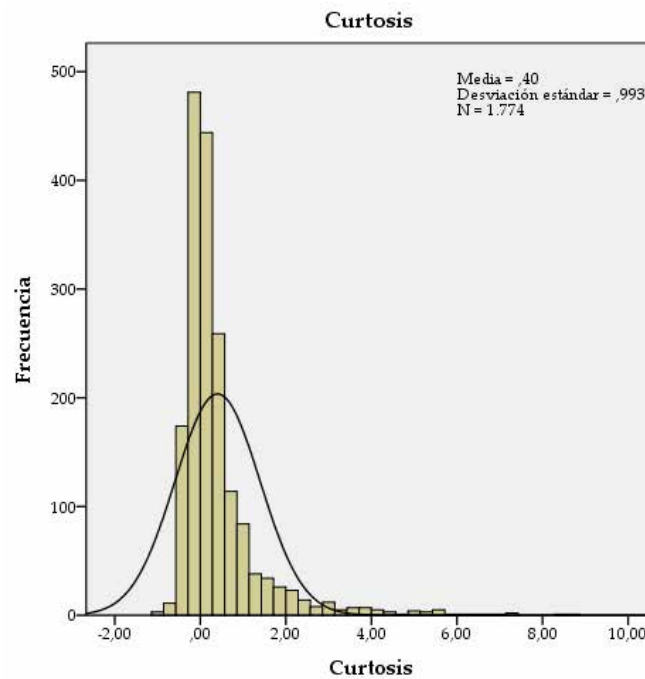
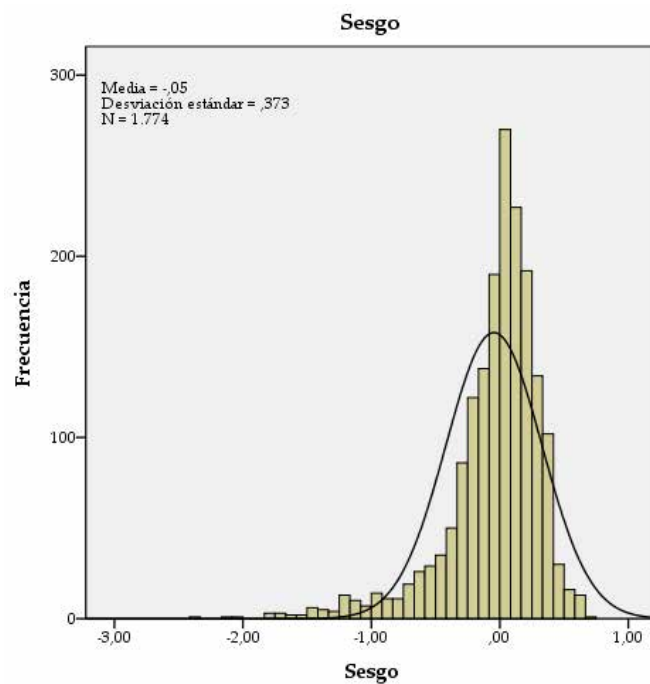
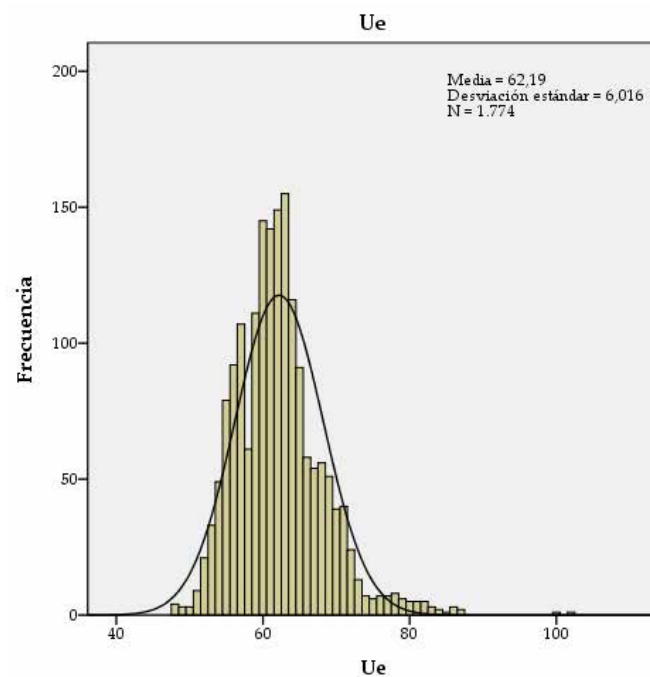


Figura F.1: Histograma mediana $[m]_{ROI}$.

Figura F.2: Histograma desviación estándar $[\sigma]_{ROI}$.Figura F.3: Histograma curtosis $[c]_{ROI}$.

Figura F.4: Histograma sesgo $[s]_{ROI}$.Figura F.5: Histograma umbral empírico $[Ue]_{real}$.

F.3 MODELO LINEAL.

El modelo ha sido construido utilizando la herramienta de IBM SPSS versión 23 a partir de la población existente realizando la regresión lineal mediante el método de pasos sucesivos. Mediante este método secuencial las variables independientes se van introduciendo en el modelo sucesivamente comenzando por la variable independiente con mayor correlación respecto a la variable dependiente hasta la de menor correlación. El resultado no será una recta de regresión como tal sino un hiperplano en un espacio multidimensional.

El modelo indicado con el número 4 incorpora todas las variables independientes. En la figura F.6a, se ha marcado en rojo el valor del índice R^2 corregido (bondad del modelo de regresión) y el coeficiente de Durbin-Watson (hipótesis de existencia de residuos no correlados en el modelo). La figura F.6b muestra en la columna B del modelo 4, los valores de los coeficientes del modelo y en la columna Beta, los coeficientes estandarizados. También se muestran los resultados de contraste de hipótesis nula t y su significación y los estadísticos de colinealidad como la *tolerancia* y el factor de inflación de la varianza FIV.

F.3.1 Validez y resultados del modelo lineal.

La verificación de inviolabilidad de las hipótesis sobre las que se basa el modelo lineal a partir del análisis de los residuos es fundamental para la validación del modelo. Los gráficos siguientes ayudan a tomar la decisión de la validación del modelo.

Las hipótesis sobre las que se estima el modelo son las siguientes [436]:

- *Normalidad de los residuos.* Se utilizan gráficos, como el histograma de los residuos tipificados y la curva p-p normal de regresión, para verificar que su distribución sigue una curva normal (ver figuras F.7a y F.7b). El valor tipificado o estandarizado z_i de una variable cuya puntuación original es x_i para un valor medio \bar{X} de una población con N casos y una desviación típica σ_x es:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma_x} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (F.5)$$

- *No autocorrelación de los residuos.* Uno de los índices más conocidos para verificar que los residuos no se encuentran correlados (son independientes entre sí) es el índice de Durbin-Watson (ver figura F.6a, última columna). Aunque hay gran variedad de criterios en cuanto al valor que debe tomar este índice para rechazar o no el modelo, uno de ellos podría ser el siguiente:
 - $DW \leq 1,1$: rechazar modelo.
 - $1,1 \leq DW \leq 1,4$: no concluyente.
 - $DW > 1,4$: aceptar modelo.
- *Existencia de homocedasticidad.* Es decir la varianza de los errores es constante. El gráfico se debe observar que no existe ningún tipo de tendencia en la dispersión de los residuos (ver figura F.8 donde se ha marcado con líneas rojas el valor de la mediana en ambas variables).

- *Linealidad en gráficos parciales.* Se analizan los gráficos de regresión de cada una de las variables independientes y la variable dependiente $[Ue]_{real}$ por separado tratando de observar la existencia de linealidad en los modelos individuales y el aporte o peso de cada una de ellas al modelo que incluye todas las variables (ver figuras F.9, F.10, F.11 y F.12 donde se dibuja en rojo la recta de regresión y se muestra el coeficiente R^2 de la regresión).
- *No existencia de multicolinealidad en los residuos.* No debe producirse colinealidad entre los residuos. Para ello, uno de los parámetros que mejor puede observarse para obtener conclusiones al respecto es el análisis del *índice de condición* del modelo. Si existen valores con índice de condición mayor a 30 y no hay, al menos, dos variables independientes cuya *proporción de varianza* sea superior a 0,90 entonces se podrá decir que no hay multicolinealidad (ver figura F.13 donde se muestra la tabla de colinealidad).

A partir del análisis de los resultados mostrados se puede decir que se obtiene un modelo lineal válido que predice el umbral empírico teórico $[Ue]_{pron}$ a partir de las variables independientes consideradas:

- Modelo matemático lineal correcto que realiza buenos pronósticos del umbral incluso para familias de aceros inoxidables diferentes como son los austeníticos y ferríticos. Para la construcción del modelo lineal no se separaron los casos por familias.
- Se observa la importancia de la variable *mediana* en la predicción del umbral estando muy por encima del resto de variables independientes. Con ella sola se podría construir un modelo más simple a pesar de no tener un coeficiente R^2 corregido tan elevado como el del modelo que integra las cuatro variables. La variable *desviación típica* también resulta importante aunque no en el grado de la *mediana* resultando interesante mantenerla dentro del modelo.
- Tampoco se ha tratado de eliminar aquellos puntos con valores realmente anómalos (outliers). Si se eliminaran se podría conseguir probablemente una mejora del modelo.

Aunque también hay ciertas reservas:

- El coeficiente de Durbin-Watson ($DW = 1,11$) está en un límite entre el rechazo del modelo y un modelo no concluyente. Se podría simplificar el modelo como se comentó antes y eliminar los outliers para tratar de elevar su valor.

La figura F.14 muestra los $[Ue]_{pron}$ (Ue^*) y $[Ue]_{real}$ (Ue) frente al número de casos ordenados ascendentemente según los valores del $[Ue]_{real}$ donde se puede observar que el modelo ajusta correctamente entre los niveles de umbral comprendidos entre 59 y 66 (números de casos 450 y 1450 respectivamente). Por debajo del umbral 59, se observa una tendencia al error positivo y por encima del 66 una tendencia al error negativo lo que indica que el modelo lineal no ajusta del todo bien para estos valores extremos de umbral. También se pueden observar dos casos con valores pronosticados que se salen de la pauta común y que dan la impresión de ser anómalos (entorno a los casos 310 y 510).

Respecto a los resultados de los índices para la comparación de modelos se han obtenido los siguientes resultados:

- $EAM = 2,07$.
- $EA_{Max} = 12,99$.
- $\sigma_{EAM} = 1,63$.

Si se eliminan los dos valores anteriores considerados como anómalos se obtendría un valor del $EA_{Max} = 10,51$. Respecto a los límites de confianza establecidos partiendo del valor de la desviación típica, se podría considerar que el 99,73 % de los datos podrían estar dentro de estos límites para $3\sigma_{EAM} = 4,89$.

Resumen del modelo^e

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				Durbin-Watson
					Cambio en K cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	
1	,846 ^a	,716	,716	3,209	,716	4460,994	1	1772	,000
2	,876 ^b	,767	,767	2,907	,051	388,257	1	1771	,000
3	,897 ^c	,805	,805	2,659	,038	346,452	1	1770	,000
4	,899 ^d	,807	,807	2,643	,002	22,854	1	1769	,000

a. Predictores: (Constante), Mediana

b. Predictores: (Constante), Mediana, Desviación

c. Predictores: (Constante), Mediana, Desviación, Curtosis

d. Predictores: (Constante), Mediana, Desviación, Curtosis, Sesgo

e. Variable dependiente: Ue

(a) Resultados.

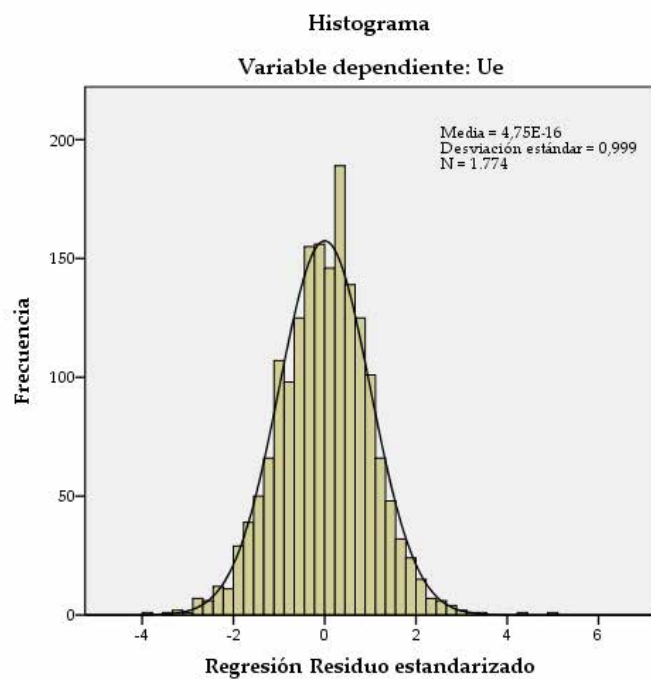
Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		Correlaciones			Estadísticas de colinealidad	
	B	Error estándar				Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte	Tolerancia	VIF
1	(Constante)	7,616	,821	9,280	,000	6,006	9,226					
	Mediana	,701	,011	66,791	,000	,681	,722	,846	,846	,846	,846	1,000
2	(Constante)	16,443	,868	18,944	,000	14,740	18,145					
	Mediana	,698	,010	73,371	,000	,679	,717	,846	,867	,842	,842	1,000
	Desviación	-,834	,042	-19,704	,000	-,917	-,751	-,241	-,424	-,226	-,226	1,000
3	(Constante)	12,426	,823	15,103	,000	10,813	14,040					
	Mediana	,781	,010	79,834	,000	,762	,801	,846	,885	,838	,838	,790
	Desviación	-1,021	,040	-25,524	,000	-1,100	-,943	-,241	-,519	-,268	-,268	,937
	Curtosis	-1,368	,074	-18,613	,000	-1,513	-1,224	,262	-,405	-,195	-,195	,748
4	(Constante)	10,144	,947	10,713	,000	8,287	12,001					
	Mediana	,801	,011	75,777	,000	,781	,822	,846	,874	,791	,791	,669
	Desviación	-,956	,042	-22,730	,000	-1,038	-,873	-,241	-,475	-,237	-,237	,838
	Curtosis	-1,041	,100	-10,396	,000	-1,237	-,845	,262	-,240	-,108	-,108	,398
	Sesgo	1,347	,282	4,781	,000	,794	1,900	-,330	,113	,050	,050	,356
												2,811

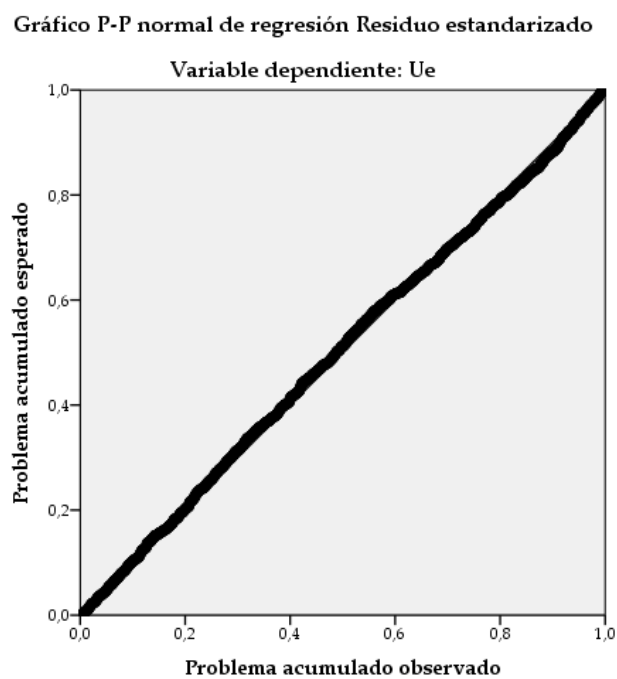
a. Variable dependiente: Ue

(b) Coeficientes.

Figura F.6: Resumen del modelo lineal.



(a) Histograma de los residuos tipificados.



(b) Curva p-p normal de regresión.

Figura F.7: Normalidad de los residuos.

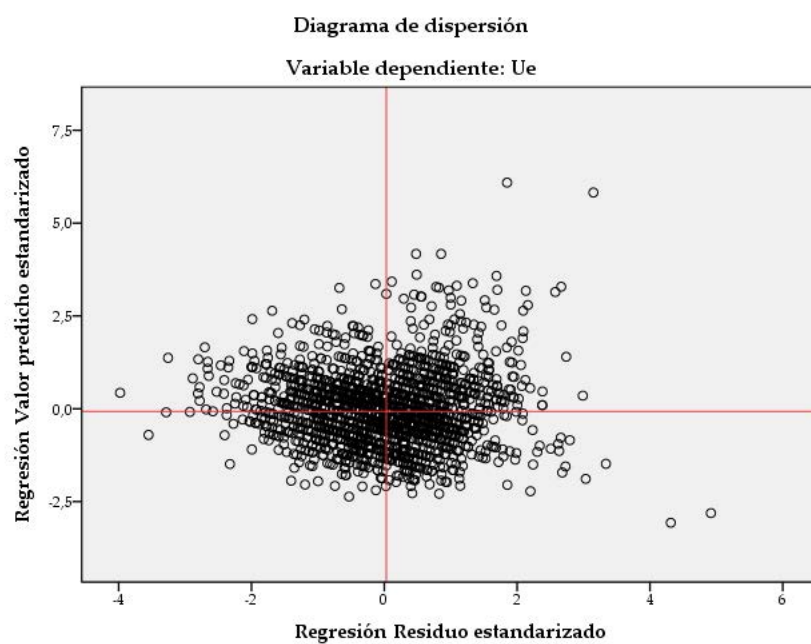


Figura F.8: Dispersión de los residuos (homocedasticidad).

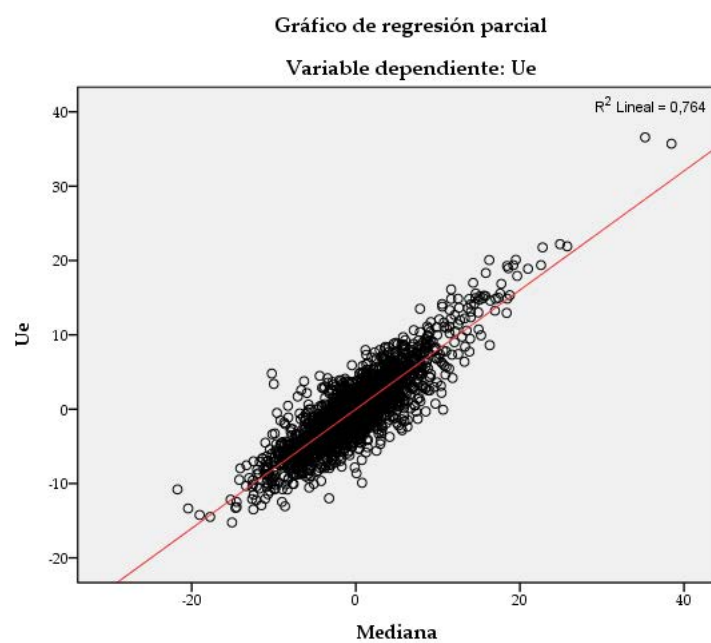


Figura F.9: Regresión lineal $[Ue]_{\text{pron}}$ frente a variable $[m]_{\text{ROI}}$.

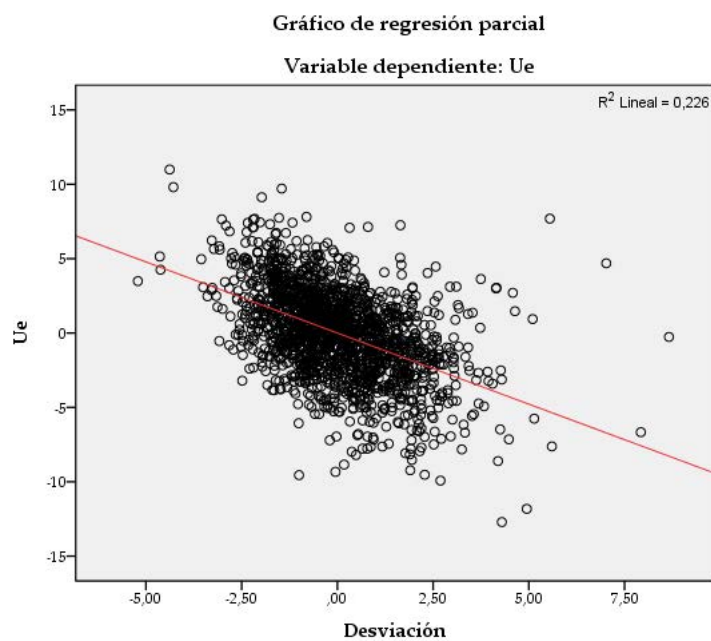


Figura F.10: Regresión lineal $[U_e]_{\text{pron}}$ frente a variable $[\sigma]_{\text{ROI}}$.

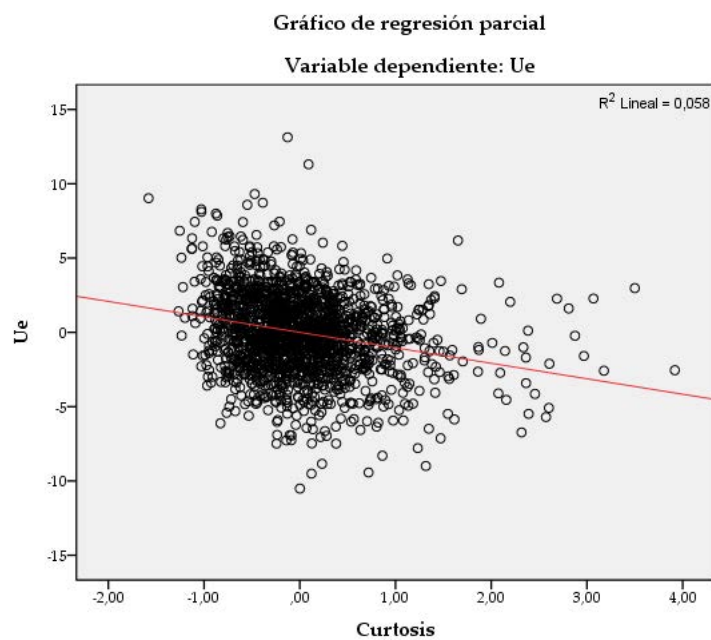


Figura F.11: Regresión lineal $[U_e]_{\text{pron}}$ frente a variable $[c]_{\text{ROI}}$.

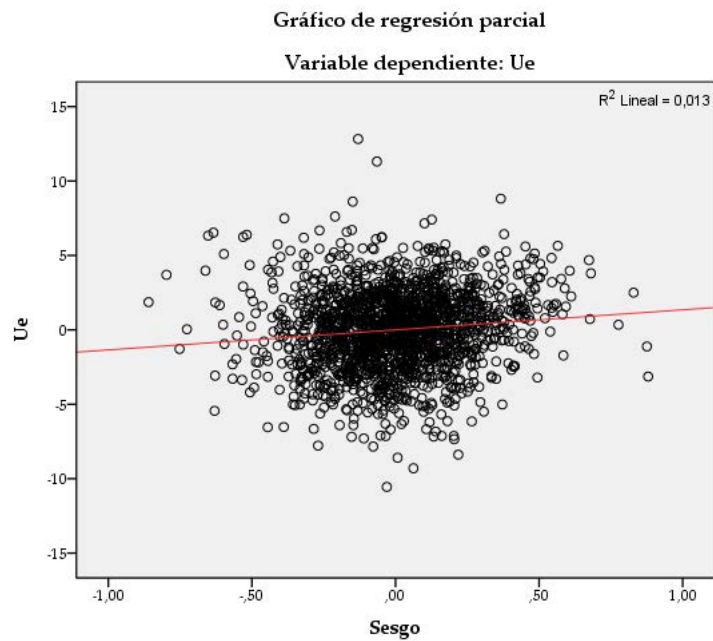


Figura F.12: Regresión lineal $[Ue]_{\text{pron}}$ frente a variable $[s]_{\text{ROI}}$.

Diagnósticos de colinealidad^a

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza				
				(Constante)	Mediana	Desviación	Curtosis	Sesgo
1	1	1,996	1,000	,00	,00			
	2	,004	21,499	1,00	1,00			
2	1	2,978	1,000	,00	,00	,00		
	2	,019	12,679	,03	,13	,86		
	3	,004	27,861	,97	,87	,14		
3	1	3,173	1,000	,00	,00	,00	,02	
	2	,808	1,981	,00	,00	,00	,73	
	3	,016	14,211	,04	,10	,95	,13	
	4	,003	30,673	,95	,90	,05	,13	
4	1	3,265	1,000	,00	,00	,00	,01	,00
	2	1,462	1,495	,00	,00	,00	,08	,12
	3	,256	3,572	,00	,00	,00	,72	,60
	4	,015	14,772	,03	,10	,87	,18	,04
	5	,003	35,404	,97	,89	,13	,01	,23

a. Variable dependiente: Ue

Figura F.13: Tabla de diagnóstico de colinealidad.

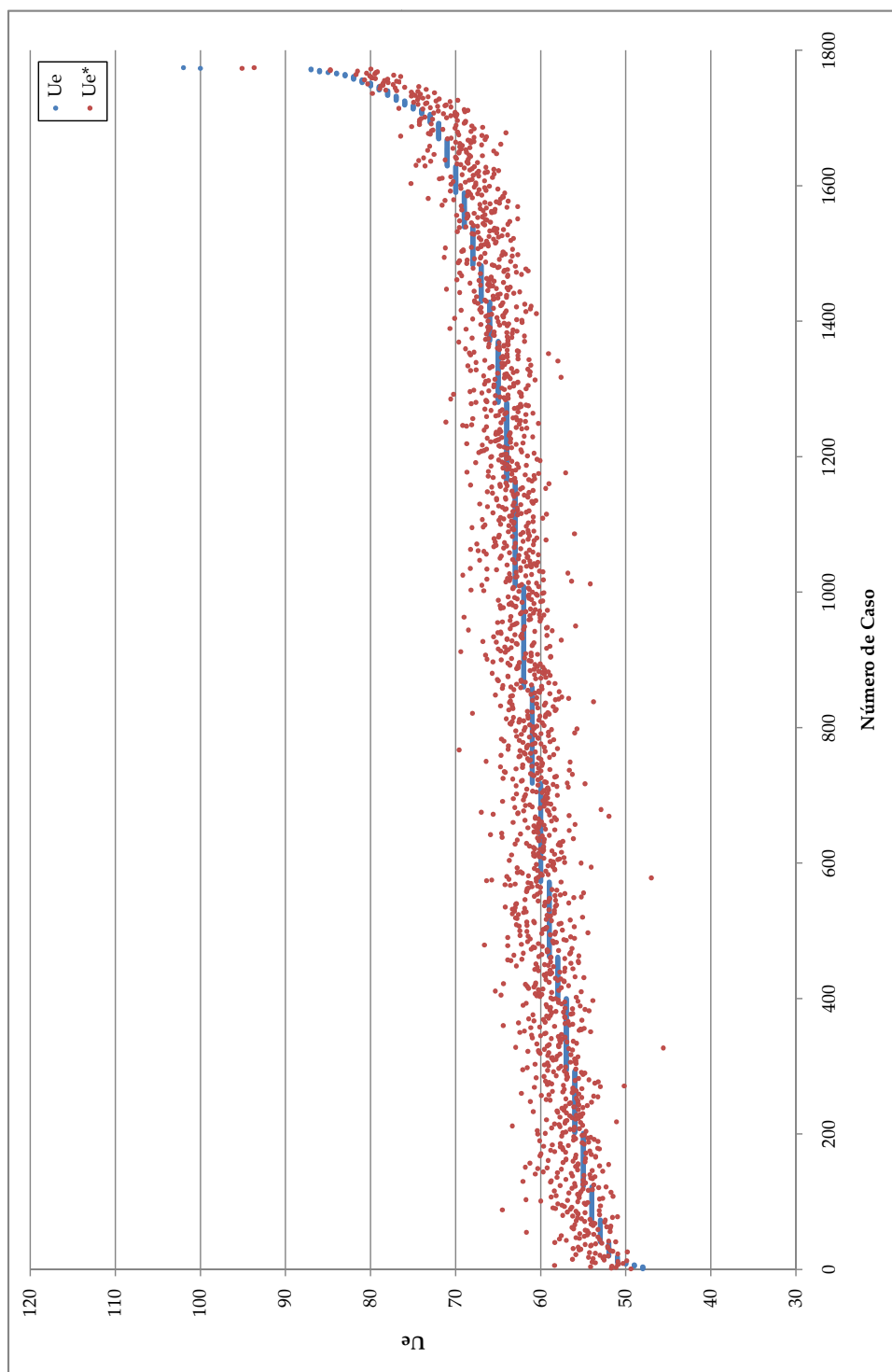


Figura F.14: Gráfico $[U_e]_{\text{pron}}$ y $[U_e]_{\text{real}}$ frente al número de casos.

F.4 MODELO NEURONAL.

Al igual que el modelo lineal que trataba de determinar los valores del umbral empírico $[Ue]_{\text{pron}}$ partiendo de una serie de variables de entrada (mediana, desviación típica, curtosis y sesgo), el modelo neuronal tratará de construir una función que pronostique este valor con la misma población de muestras, es decir, se va a requerir una red neuronal que actúe como *aproximador funcional universal*.

La arquitectura neuronal elegida es un perceptrón multicapa, con cuatro variables de entrada, una única capa oculta con un determinado número de neuronas y una única salida. Las funciones de transferencia seleccionadas para las neuronas que componen la capa oculta es la tangente hiperbólica y para la neurona de salida la función lineal. Para la construcción del modelo neuronal se ha utilizado la herramienta de diseño de redes neuronales de Matlab [62].

Mediante esta arquitectura se desea contruir el modelo neuronal con el menor número de neuronas en la capa oculta que genere los mejores índices comparativos y generalice bien, es decir, a partir de nuevos casos o muestras sea capaz de seguir pronosticando correctamente. Para ello, la metodología de entrenamiento utilizada para la creación del modelo está basada en el método de *validación cruzada* donde se divide aleatoriamente el total del número de casos en tres poblaciones distintas:

- Población de entrenamiento (80 % de los casos). Población para el entrenamiento de la red neuronal.
- Población de validación (10 % de los casos). Población para el ajuste de la red neuronal.
- Población de prueba, test o generalización (10 % de los casos). Población dedicada a la estimación del error de generalización.

El *entrenamiento de la red* se realizará mediante el aprendizaje basado en el algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. Posteriormente se realiza un *procedimiento de refinado* mediante la *poda* de la red eliminando aquellas conexiones y unidades de proceso que se consideren poco relevantes.

F.4.1 Validez y resultados del modelo neuronal.

Las figuras F.15 y F.16 muestran los errores EAM y EA_{Max} obtenidos por el perceptrón multicapa en función del número de nodos de la capa oculta. Como puede observarse, el error comienza con un valor elevado que va decreciendo hasta alcanzar un mínimo, tras el cual, vuelve a incrementarse de nuevo. Los mejores resultados se obtienen para el modelo con 5 nodos donde se obtienen $EAM = 1,917$ y $EA_{\text{Max}} = 6,766$ (figura F.17).

Considerando la arquitectura del modelo de 5 nodos en la capa oculta, la figura F.18a muestra la evolución de los errores cuadráticos medios de la población de entrenamiento, de validación y test en escala logarítmica en función del número de épocas del entrenamiento. Se puede observar como los errores decrecen conforme avanza el entrenamiento hasta alcanzar unos valores del error estables en cada población. El análisis de post-entrenamiento (figura F.18b) muestra un coeficiente de regresión elevado $R = 0,902$ entre la salida de la red $[Ue]_{\text{pron}}$ (A) y los patrones de entrenamiento $[Ue]_{\text{real}}$ (T).

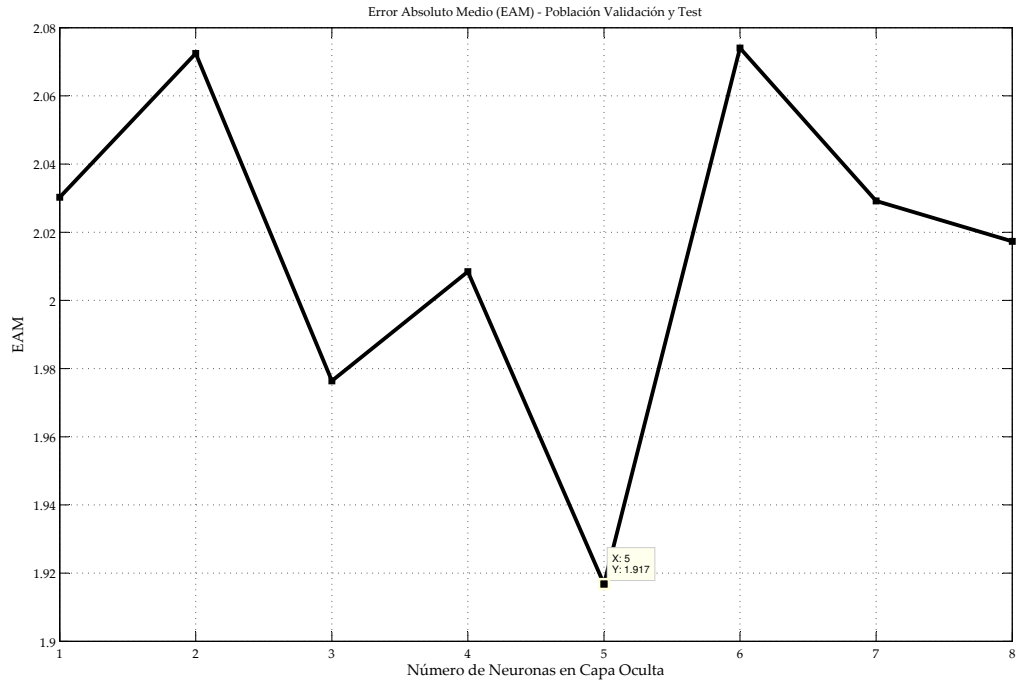
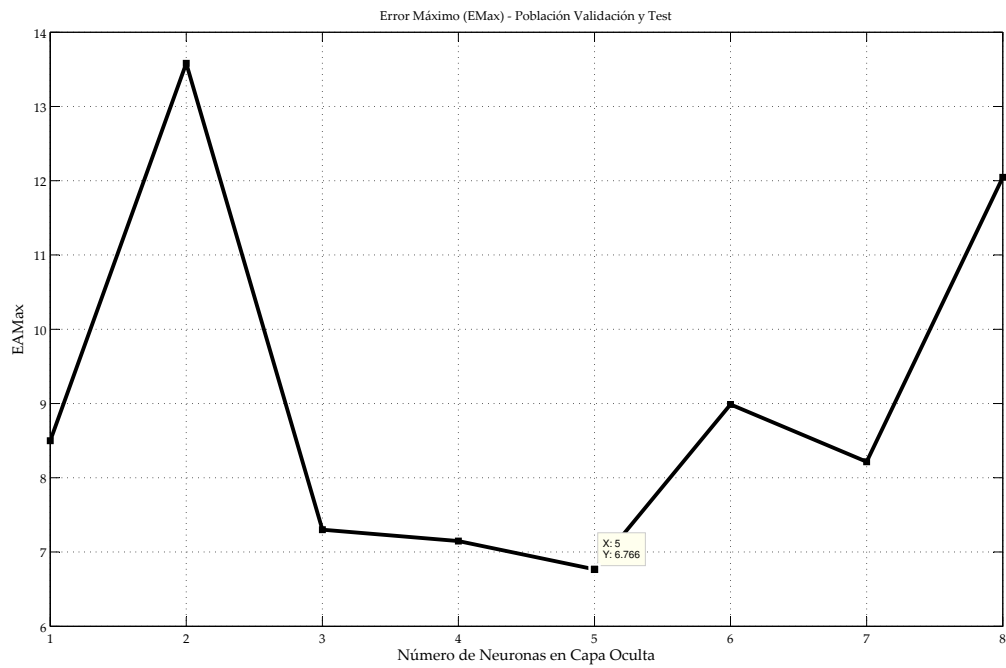


Figura F.15: EAM en función del número de nodos en la red oculta.

Figura F.16: EA_{Max} en función del número de nodos en la red oculta.

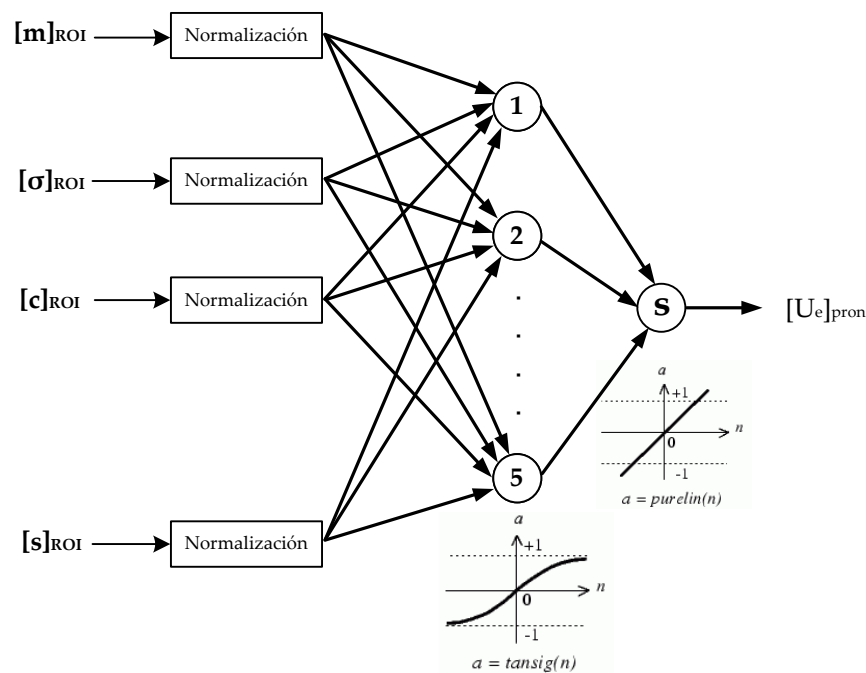


Figura F.17: Perceptrón multicapa (5 nodos en capa oculta).

	Neurona						Neurona S
	1	2	3	4	5		
$[m]_{ROI}$	5,86	4,86	0,42	0,26	11,5	1	1,19
$[\sigma]_{ROI}$	-3,87	-3,82	3,99	-0,11	-12,7	2	0,12
$[c]_{ROI}$	-5,01	-12,3	0,05	0,00	37,0	3	9,38
$[s]_{ROI}$	-7,88	-23,0	-0,02	-0,05	25,8	4	22,5
Sesgo Neurona	-16,2	7,68	1,14	-0,06	5,89	5	0,23
						Sesgo Neurona	68,6

(a) Capa oculta.

(b) Capa Salida.

Tabla F.1: Pesos sinápticos y sesgos de la red neuronal.

Los valores de los pesos y los sesgos de la capa oculta y la capa de salida obtenidos para la aquitectura con 5 nodos en la capa oculta se muestran en las tablas F.1a y F.1b respectivamente.

Respecto a la representación gráfica (figura F.19) de los umbrales empíricos pronosticados por el modelo $[Ue]_{pron}$ en función del error obtenido $[Ue]_{pron} - [Ue]_{real}$, ambos tipificados, no se observa ningún tipo de tendencia en los residuos. La población que se ha usado ha sido la compuesta por la de validación y la de test.

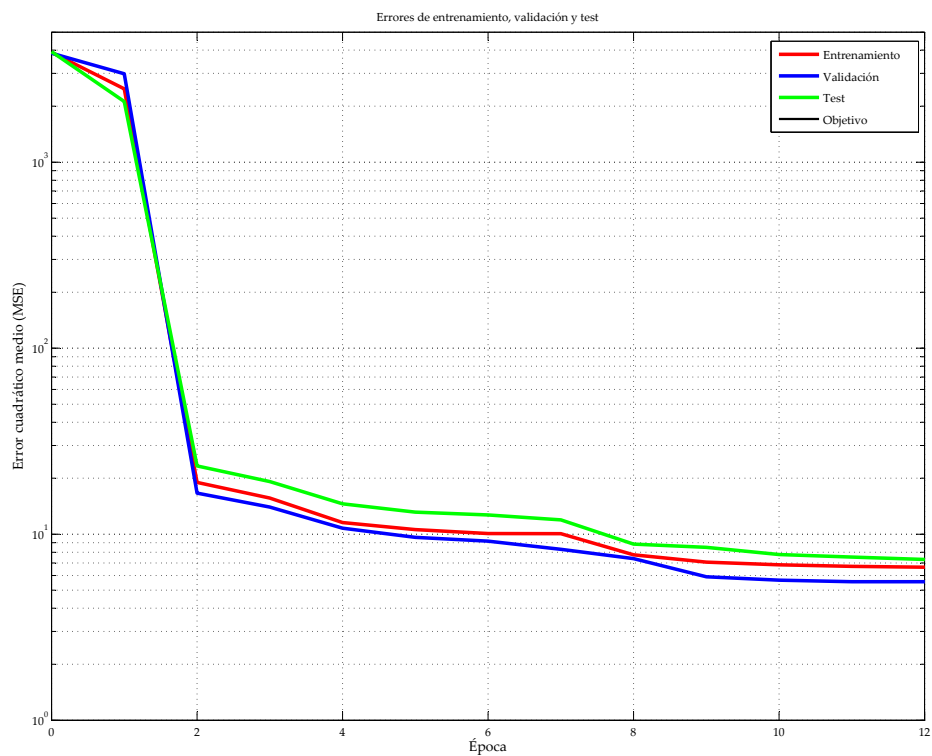
La figura F.20 muestra los $[Ue]_{\text{pron}}$ (Ue^*) y $[Ue]_{\text{real}}$ (Ue) frente al número de casos ordenados ascendentemente según los valores del $[Ue]_{\text{real}}$ donde se puede observar que el modelo ajusta correctamente entre los niveles de umbral comprendidos entre 58 y 63 (números de casos 70 y 240 respectivamente). Por debajo del umbral 58, se observa una tendencia al error positivo y por encima del 63 una tendencia al error negativo lo que indica que el modelo neuronal, al igual que el lineal, no ajusta del todo bien para estos valores extremos de umbral. En general, no se observan valores pronosticados que se salgan de lo común (outliers).

Respecto a los resultados de los índices para la comparación de modelos se han obtenido los siguientes resultados:

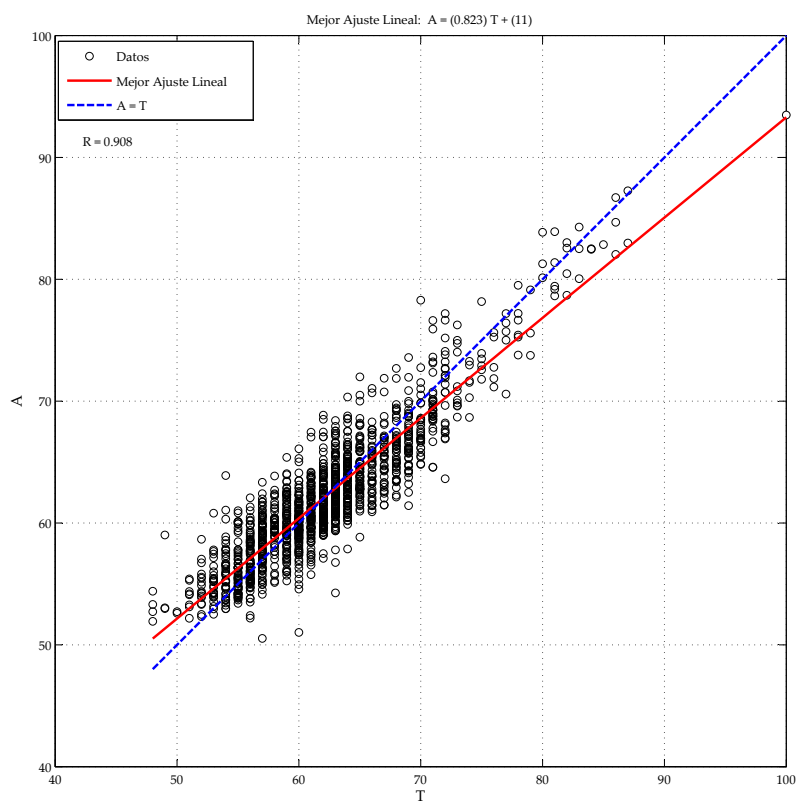
- $EAM = 1,92$.
- $EA_{\text{Max}} = 6,76$.
- $\sigma_{EAM} = 1,47$.

Se podrían establecer unos límites de confianza considerando el valor de la desviación típica donde el 99,73 % de los datos caerían dentro de estos límites para $3\sigma_{EAM} = 4,41$.

Finalmente, el modelo neuronal propuesto, basado en un perceptrón multicapa con 5 nodos en la capa oculta predice el umbral empírico teórico $[Ue]_{\text{pron}}$ a partir de las variables independientes consideradas, realiza unos buenos pronósticos del umbral y generaliza bien para todas las familias de aceros inoxidables (no se separaron las poblaciones).



(a) Gráfico de errores de entrenamiento.



(b) Gráfico de regresión del análisis post-entrenamiento.

Figura F.18: Análisis del entrenamiento y post-entrenamiento.

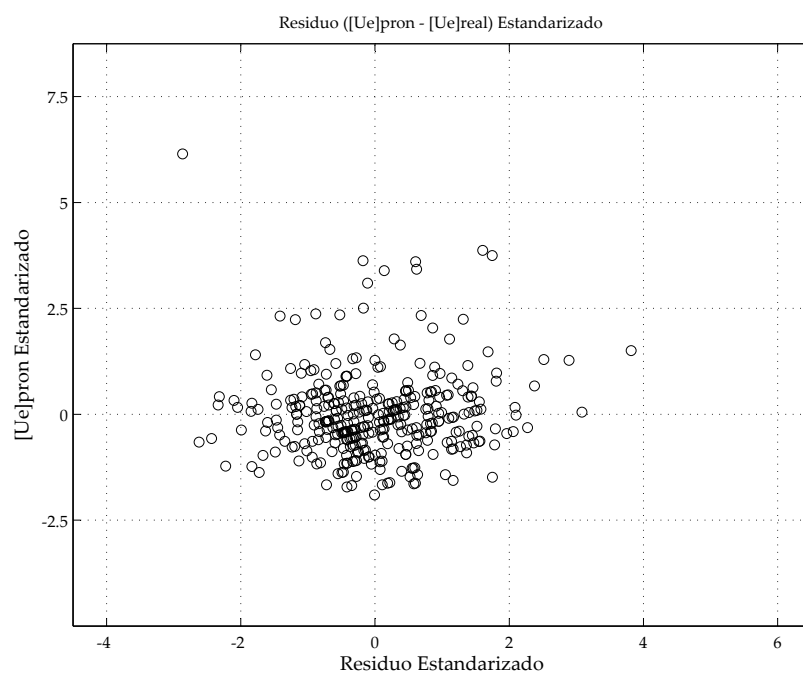


Figura F.19: Dispersión de los residuos.

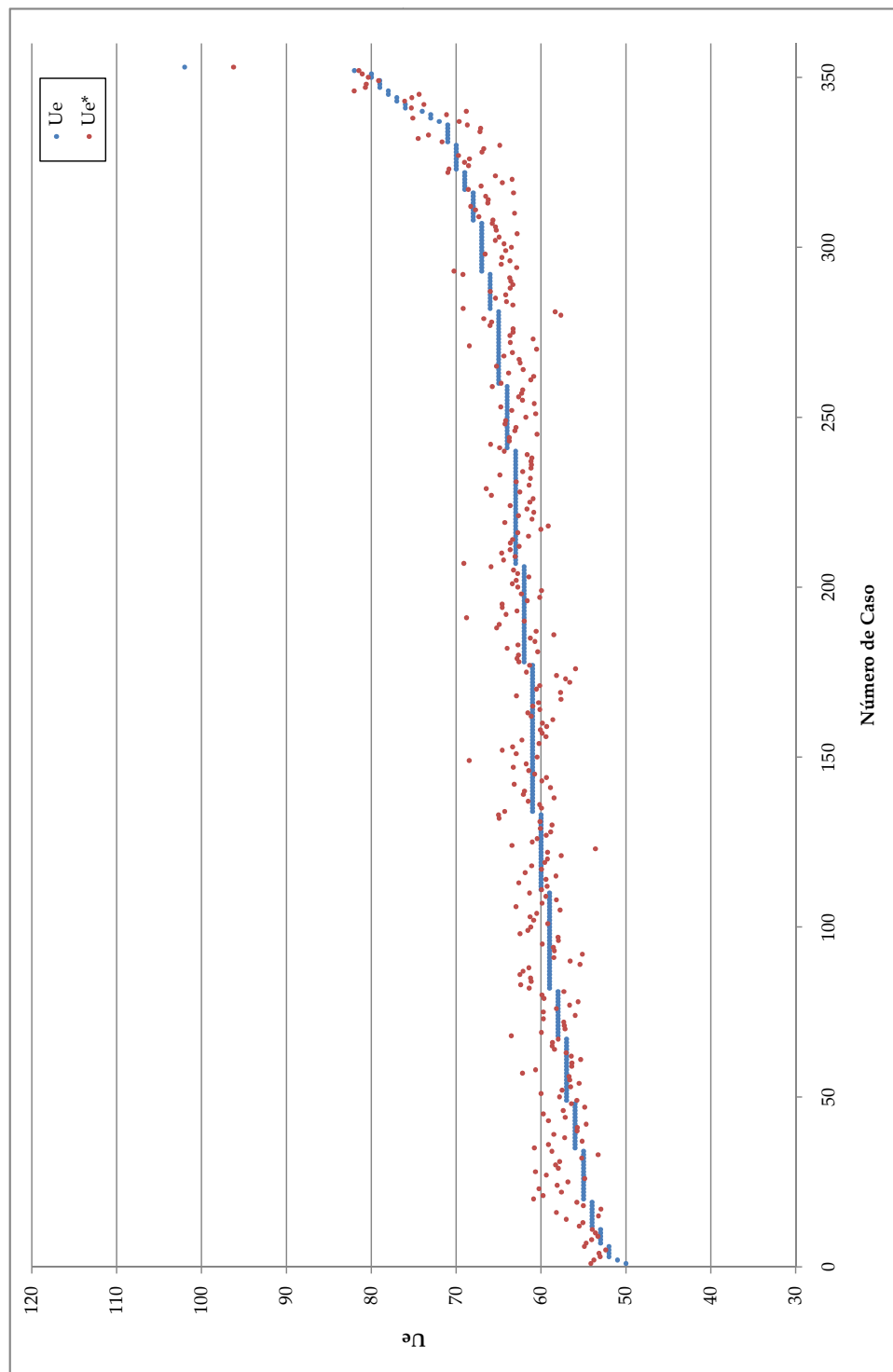


Figura F.20: Gráfico $[U_e]_{\text{pron}}$ y $[U_e]_{\text{real}}$ frente al número de casos.

ELEMENTOS DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN

G.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.

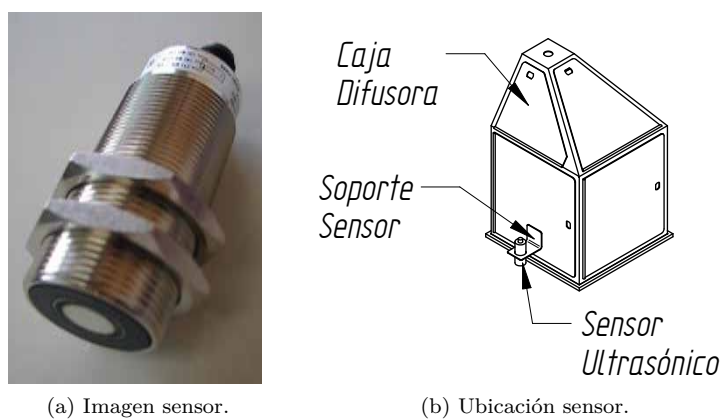


Figura G.1: Sensor de desplazamiento ultrasónico.



Figura G.2: Elementos en interior de caja difusora.

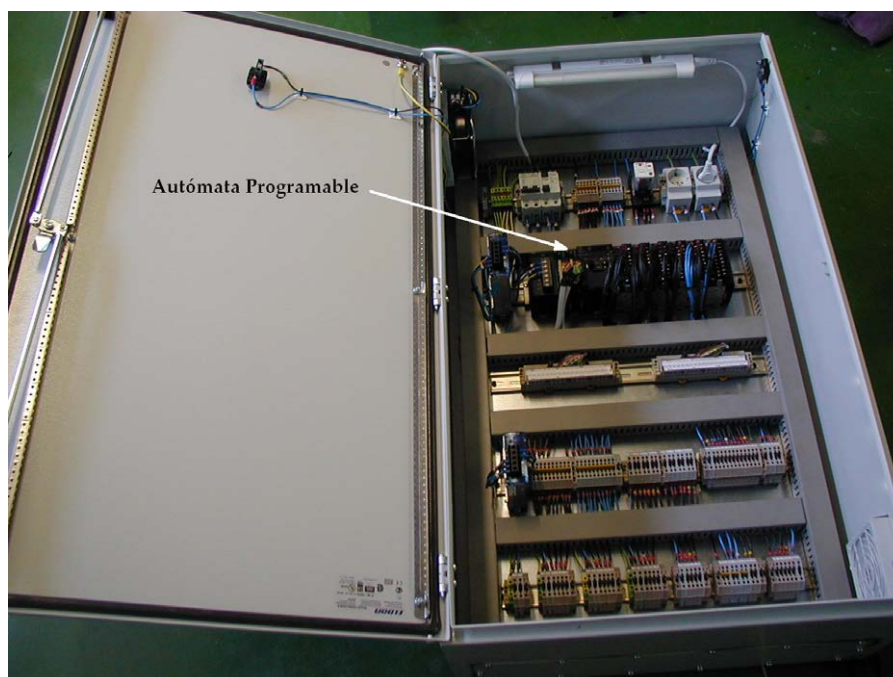


Figura G.3: Autómata programable (armario de control).



Figura G.4: Servo-drivers (armario de potencia).

G.2 PC DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO.

La tarjeta capturadora seleccionada para el diseño estándar del sistema tiene un ancho de banda de 133 MB/s (Dalsa PCVisionPlus) y para el diseño compacto 250MB/s (Dalsa PC2-Vision), valores más que suficientes para no tener problemas con la adquisición de imágenes (son valores superiores al valor de la tasa instantánea de datos calculado $DR_i = 28,63 \text{ MB/s}$).

El *pixel rate* PR (velocidad a la que el software del PC de adquisición y procesamiento va a recibir una imagen completa desde la cámara) que se obtuvo, considerando una tasa de adquisición de imágenes o *frame rate* de 1,01 muestras/s, fue de $PR = 1,73 \text{ MB/s}$.

El PC de adquisición y procesamiento seleccionado está formado por un chasis industrial de 19" (figura G.5) con backplane pasivo que lleva insertada una tarjeta CPU industrial con un procesador intel dual core de 3,6 GHz y 1 GB de memoria SDRAM bajo un sistema operativo Windows 2000 (diseño estándar) o intel core 2 duo de 2,2 GHz y 2 GB de memoria DDR2 bajo un sistema operativo Windows XP (diseño compacto).

Además de la tarjeta CPU, el backplane pasivo del PC lleva insertada la tarjeta capturadora y una tarjeta serie RS-422/485 para establecer la comunicación entre el PC industrial y el PLC de control.



Figura G.5: Chasis industrial 19".

G.3 APLICACIONES SOFTWARE DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN.

G.3.1 *Adquisición y procesamiento de imagen.*

Esta aplicación, desarrollada en C++, tiene como funciones principales la adquisición de imágenes de la cámara, su procesamiento para la detección de óxido residual y la generación de resultados en forma de imágenes y estadísticas.

El control del proceso de adquisición de imágenes requiere que la aplicación se comuniquen con la tarjeta capturadora implementando una serie de funciones contenidas en librerías específicas suministradas con la tarjeta (inicialización de la tarjeta, solicitud de información, configuración de las características de la imagen a adquirir, adquisición de imagen, control del disparo de los proyectores estroboscópicos, etc.).

Una vez adquirida la imagen esta es procesada aplicando el algoritmo de procesamiento. Los resultados generados se almacenan localmente hasta que se detecta el evento de finalización de la bobina.

Paralelamente al proceso de adquisición y procesamiento de imagen, la aplicación está accediendo a la base de datos para la obtención de la identificación de la bobina en proceso y su evento de finalización. Este último determina cuando se encuentra disponible una nueva identificación de bobina y los datos asociados con ella (tipo de acero, longitud y espesor nominal de la bobina, etc.).

Durante estos accesos también se recaba información de la ubicación de los bordes detectados por el sistema de inspección de medida de ancho de la bobina¹ para la actualización del rango correspondiente con el movimiento de barrido del sistema de inspección.

Otro de los procesos que se realiza en paralelo es el acceso al PLC de control para la lectura del metraje. Para ello, la aplicación se conectará a la *aplicación de comunicación con PLC de control* para solicitar este dato.

Ante el evento de finalización de una bobina, la aplicación realiza la operativa de almacenamiento de resultados finales de bobina definida en la sección 9.4.3.

G.3.2 *Comunicación con PLC de control.*

La función principal de esta aplicación, desarrollada en C++, es la de servir como interlocutor entre el PLC de control y aplicaciones que requieran acceder al PLC para la lectura y escritura de determinadas posiciones de memoria.

Para realizar esta función necesita, por un lado, implementar un servidor de datos para la transferencia de información con las aplicaciones y, por otro lado, implementar un protocolo de comunicación basado en el envío de comandos de lectura y escritura de la memoria del PLC.

El lado del servidor es un socket TCP/IP, al cual se conectan las aplicaciones clientes solicitando la ejecución de determinadas acciones bajo un determinado formato de tramas o paquetes conocido.

¹ Sistema de inspección instalado en línea AP2 de la factoría de Los Barrios (Cádiz).

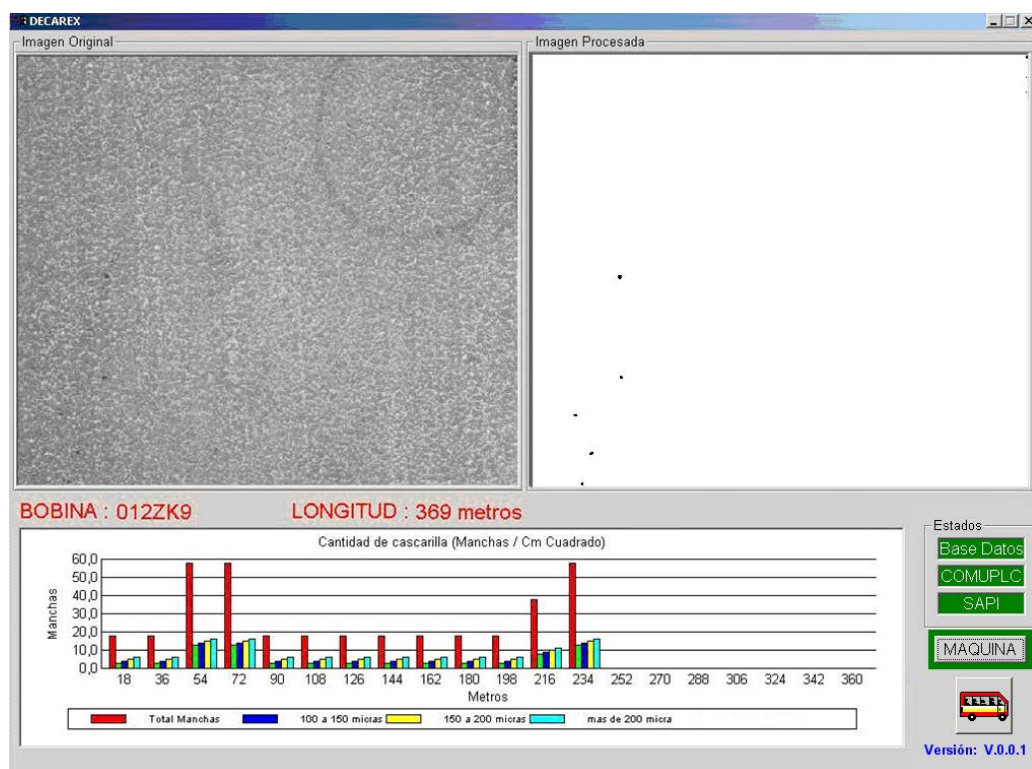


Figura G.6: Aplicación de monitorización y supervisión.

Los comandos recibidos de las aplicaciones clientes son decodificados y convertidos en otras tramas que siguen el protocolo requerido para comunicarse con el PLC.

Una vez convertidos, los paquetes son enviados a través de una comunicación física RS-422 hasta uno de los puertos de comunicación del PLC que procesa la trama y responde al comando.

G.3.3 Monitorización y supervisión del operador de control de calidad.

Aplicación interfaz de usuario, desarrollada en PowerBuider, instalada en el PC de adquisición y procesamiento. Sus funciones principales son mostrar los datos y resultados de las bobina en proceso y proveer de una interfaz para el control del servomecanismo. La aplicación está compuesta de dos ventanas:

- *Ventana principal* (figura G.6). Dividida en tres partes:
 - Zona de visualización de imágenes (parte superior de la ventana). Muestra una imagen real seleccionada de la superficie de inspección y la imagen resultado de su procesamiento por el algoritmo de detección de óxido residual. Las imágenes se actualizan cada 5 segundos aproximadamente, tiempo suficiente para permitir al operador un análisis rápido de la imagen. Las imágenes mostradas son aquellas que contienen un mayor número de defectos. Debajo de las imágenes, se muestra la identificación de la bobina y su longitud actual.

- Zona de visualización del gráfico de barras de densidad de defecto (parte inferior). Muestra una representación gráfica en diagrama de barras de los promedios de las densidades de manchas por tramo $\bar{\rho}_i$ de cada grupo dimensional i frente al metro de bobina.
 - Zona de estado de aplicaciones y acceso al control del servomecanismo (parte inferior derecha). En esta zona se muestran una serie de etiquetas con el estado operativo de la aplicación de adquisición y procesamiento de imagen, la aplicación de comunicación con PLC de control y la conexión con la base de datos (verde: operación normal; rojo: fallo). Bajo estas etiquetas, existe un botón que abre la interfaz de control del servomecanismo.
- *Ventana de control del servomecanismo* (ver figura 9.13b en sección 9.2.8 del capítulo 9). Mediante esta ventana se tiene acceso al control del servomecanismo y a información sobre el estado y posibles errores en el que se puede encontrar el sistema.

Los datos mostrados en la *ventana principal* provienen de la lectura de los resultados generados por la *aplicación de adquisición y procesamiento* y de información obtenida de la base de datos. La información mostrada en la *ventana de control del servomecanismo* y el control de éste se realiza enviando una serie de comandos a la *aplicación de comunicación con el PLC de control*.

G.3.4 Ajuste del sistema de inspección.

Esta aplicación es utilizada por personal de mantenimiento del sistema de inspección para asistirle en la corrección de ciertos desajustes que pudieran existir o, simplemente, realizar una verificación del estado actual del sistema.

La aplicación está compuesta, a su vez, por dos aplicaciones:

- Aplicación base, desarrollada en C++, que realiza la adquisición y el procesamiento de imágenes y genera una serie de resultados.
- Aplicación de nivel superior, desarrollada en PowerBuilder, que realiza las siguientes funciones:
 - Comunicación con la aplicación base para el control del proceso de adquisición de imágenes y la determinación del tipo de procesamiento de imagen a realizar.
 - Lectura de los resultados generados por la aplicación base para su visualización en la interfaz de usuario.

Su funcionamiento básico se basa en la adquisición y procesamiento de la imagen para la extracción de ciertos índices necesarios para las verificaciones:

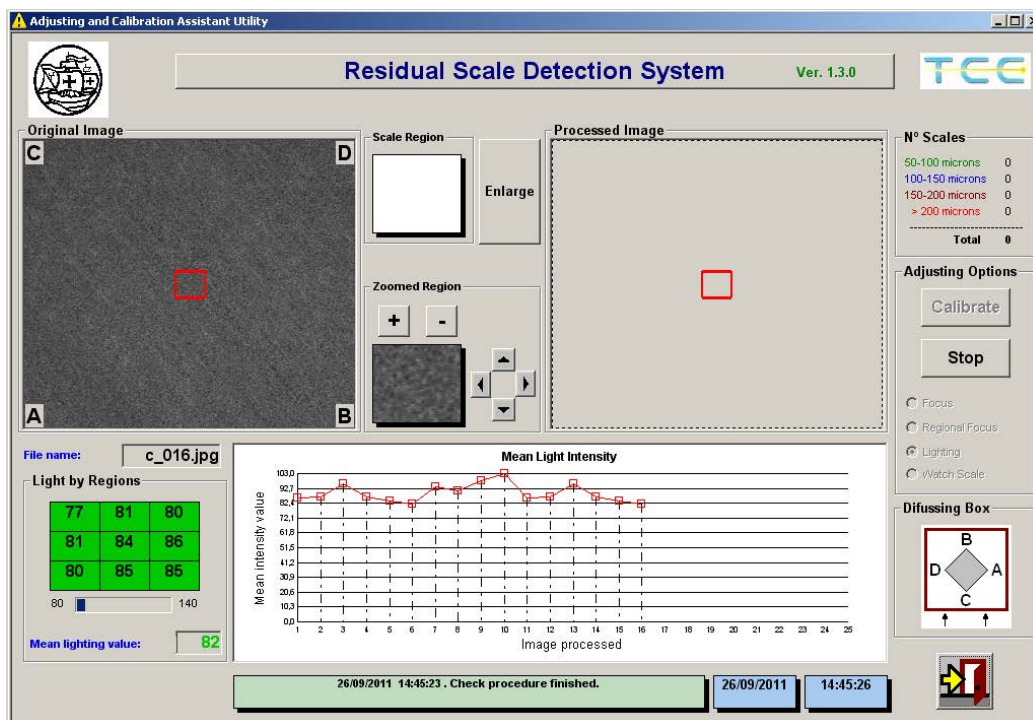
- *Medida del nivel de gris global y local de la imagen* (figura G.7a). El valor del nivel de gris global (mediana de la imagen) permite comprobar el nivel de desgaste de las lámparas de los proyectores estroboscópicos. Muestra una representación gráfica de este valor frente al tiempo. Para la medida del nivel de gris local, la imagen es dividida en 9 zonas para comprobar si existe algún desajuste en alguna de las zonas. Se utiliza generalmente para optimizar la orientación de los proyectores estroboscópicos en el interior de la caja difusora.
- *Medida del nivel de enfoque global y local de la imagen* (figura G.7b). Calcula un índice que se corresponde con el nivel del enfoque de la imagen completa (global) o por zonas (local) y lo representa de forma gráfica frente al tiempo. Con este valor se asiste al operador en el procedimiento de ajuste de la lente.

El cálculo del índice del nivel de enfoque se realiza en varios pasos:

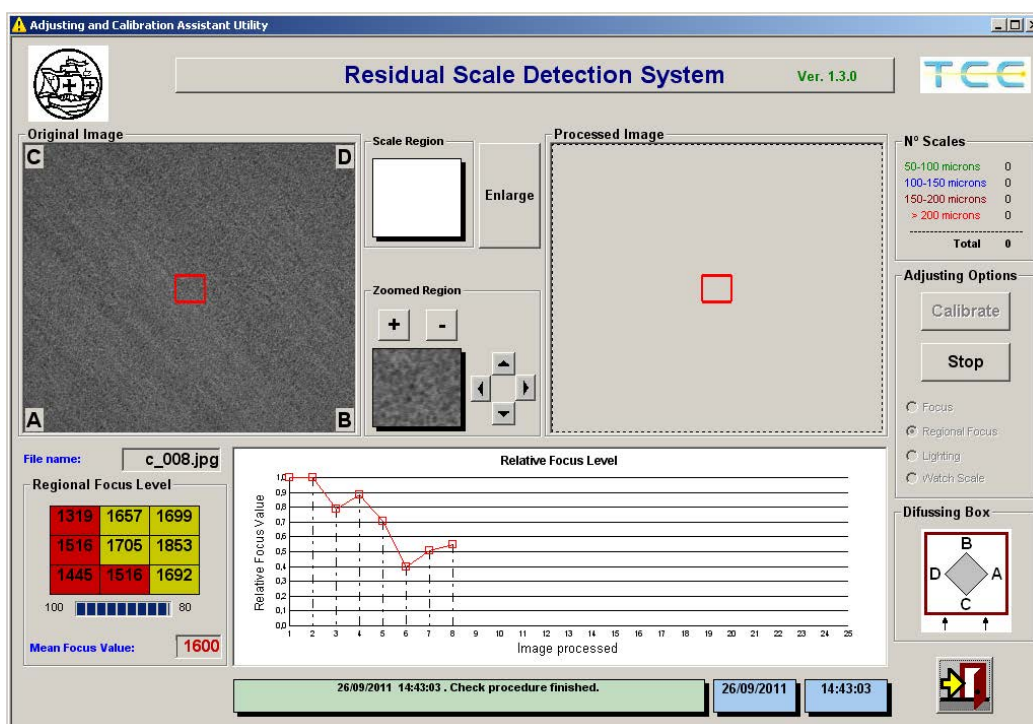
- Filtrado de la imagen completa mediante su convolución por una máscara de Sobel horizontal de 3×3 .

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (G.1)$$

- Cálculo de la mediana de la imagen filtrada (global y local por cada zona).
- Cálculo de la desviación típica de la imagen filtrada a partir de la mediana (global o local por cada zona). El resultado de este cálculo será el valor del índice.



(a) Ajuste del nivel de iluminación.



(b) Ajuste del nivel de enfoque.

Figura G.7: Aplicación de ajuste del sistema de inspección.

G.3.5 Monitorización y análisis y consulta de datos históricos.

La *aplicación de monitorización* es una instancia de la aplicación de monitorización y supervisión del operador de control de calidad que se configura, mediante un parámetro de su archivo de inicialización de la aplicación, para que funcione exclusivamente con las funciones de monitorización (tiene inhabilitadas las funciones para el control del sistema de inspección).

La interfaz presenta los mismos elementos en su ventana principal: imágenes reales y procesadas de la inspección de la bobina que se está procesando en la línea de producción y la representación gráfica del diagrama de barras con los valores de densidad de óxido residual de cada grupo dimensional.

Para poder utilizar la aplicación se debe tener acceso al PC de adquisición y procesamiento para leer los ficheros de imágenes y los ficheros de texto de las imágenes procesadas y estadísticas.

La *aplicación de análisis y consulta de datos históricos* es una aplicación, desarrollada en PowerBuilder, que muestra los resultados de bobinas que ya han sido procesadas en la línea de producción.

Cuando se inicia la aplicación aparece una interfaz (figura G.8a) con cajas de introducción de texto, listas desplegables, botones de función, ventanas de imágenes reales y procesadas y la representación gráfica del diagrama de barras de densidades de óxido residual de toda la bobina.

La interfaz ofrece dos formas de acceder a los datos de las bobinas procesadas: consulta mediante la introducción de la identificación de la bobina que se desea consultar y consulta por selección de rango de fechas.

Esta última requiere la introducción de la fecha inicial y final del rango deseado. Una vez que se ha seleccionado el rango y se pulsa el botón de *Aceptar* se muestra una nueva ventana con un listado de todas las bobinas que han sido procesadas en el rango de fecha introducido (figura G.8b).

Los datos relativos a cada bobina se visualizan en una fila que tiene los siguientes campos:

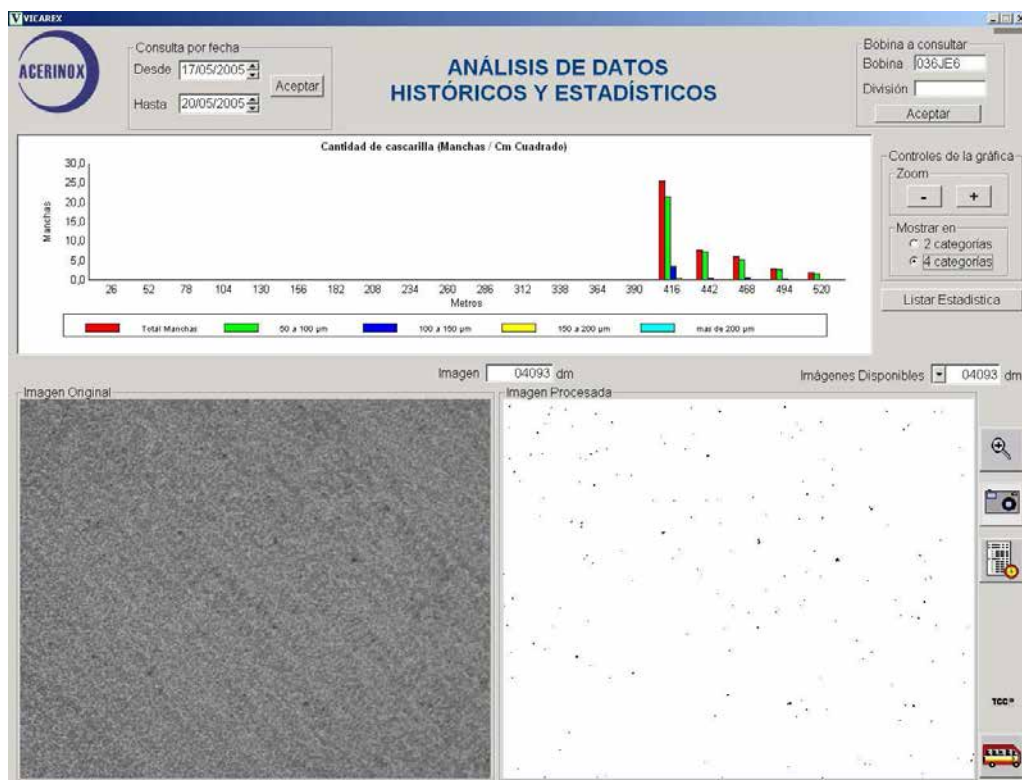
- *Fecha de finalización*: fecha en la que finalizó el procesamiento de la bobina en la línea de producción.
- *MaxZ1 y metro*: valor máximo de densidad de óxido residual total de los cuatro grupos dimensionales alcanzado en el primer tercio de la bobina (zona denominada en el argot como la cabeza de la bobina) y metro correspondiente donde se alcanza este valor.
- *MaxZ2 y metro*: valor máximo correspondiente al segundo tercio de la bobina.
- *MaxZ3 y metro*: valor máximo correspondiente al último tercio de la bobina (cola de la bobina).

De común acuerdo con el fabricante, los resultados de los valores máximos se codifican con colores que representan el grado de incidencia del defecto:

- *Blanco* ($[0, 2)$ manchas/cm²): grado de incidencia bajo.
- *Amarillo* ($[2, 10)$ manchas/cm²): grado de incidencia significativo.
- *Naranja* ($[10, 30)$ manchas/cm²): grado de incidencia elevado.
- *Rojo* (≥ 30 manchas/cm²): grado de incidencia grave.

Una vez seleccionada la bobina de interés, se mostrarán los datos correspondientes con ella en la ventana principal de la interfaz (figura G.8a). Además de la representación gráfica del diagrama de barras, la interfaz permite mostrar los resultados de las estadísticas de forma tabular y seleccionar imágenes reales y procesadas representativas de cada tramo de 10 m en el que fue dividida la bobina. Mediante un botón de zoom habilitado para ello, se pueden mostrar las imágenes ampliadas para apreciarlas con mayor detalle.

Esta aplicación puede operar desde cualquier ubicación de la factoría que disponga de acceso a la base de datos y al servidor repositorio de ficheros.



(a) Ventana principal.

Resumen

Para visualizar los datos de una bobina, haga doble click sobre su nombre

Fecha finalización	Bob - Div	MaxZ1	Metro	MaxZ2	Metro	MaxZ3	Metro
16/05/2005 00:50:48	056JP4	0	0	0,2	282,5	0	0
16/05/2005 01:05:27	056ET7	0,4	12,5	0,7	202,8	32,6	403,1
16/05/2005 01:26:56	036JR3	0,7	12,8	0	0	0,1	597,3
16/05/2005 04:07:55	026JR3	0	0	0	0	3,5	556
16/05/2005 04:32:51	046JR4	0	0	0	0	0,4	570,3
16/05/2005 05:12:03	046HX9	0,9	94,8	1,2	105,1	2,6	434,9
16/05/2005 05:33:37	016HX9	22	35,1	7,1	394,8	16,3	454,7
16/05/2005 05:54:40	026HX9	1,3	62,7	0,2	413,2	1,6	522,4
16/05/2005 06:17:56	036HX9	0	0	0,3	422,1	2,3	492
16/05/2005 06:37:48	056HX9	0,2	12,2	1,1	402,8	2	512,5
16/05/2005 06:59:15	066ET6	1,2	12,5	0,4	412,8	3,5	573,2
16/05/2005 07:20:54	046ET5	0,9	12,6	0,9	132,7	30,3	553,4
16/05/2005 12:46:58	016JK8	0	0	0,3	252,7	0,3	462,6
16/05/2005 13:10:48	026JK9	2,9	10,1	0,1	310,4	2,8	440,6
16/05/2005 13:32:56	016JL1	3,6	21,5	0,1	401,9	0,3	501,4
16/05/2005 13:55:33	016JK9	0,3	68,8	0,1	412,8	0,3	522,7
16/05/2005 14:18:27	026JL0	0,4	56,5	0,1	362,9	1,8	492,9
16/05/2005 14:48:29	036JK8	0,2	12,3	0,7	392,5	0,5	442,5
16/05/2005 15:12:50	036JN6	2,3	0,9	16,8	222,4	51,2	372,4
16/05/2005 15:35:52	056JMA	0,2	12,9	0,9	253,1	1,5	418,4
16/05/2005 16:24:12	016JJ9	0,4	12,6	0,3	282,4	0,3	292,3
16/05/2005 16:54:01	026JJ9	0	0	2,3	272,3	6,5	282,8
16/05/2005 17:14:15	036JJ9	0	0	0	0	2,4	302,5
16/05/2005 17:33:24	026JJ8	0	0	5	202,9	9,6	312,3
16/05/2005 17:53:51	026JK1	4,7	12,6	7,9	312,7	10,5	342,7
16/05/2005 18:14:39	036JK6	0,3	12,6	0,8	332,4	0,9	372,5
16/05/2005 18:42:58	016JK6	1,2	12,7	1,1	322,8	0,5	432,5
16/05/2005 19:05:35	046JK1	1,4	12,6	0	0	0	0

(b) Ventana de selección de bobina.

Figura G.8: Análisis de datos históricos y estadísticos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Various AUTHORS : Electronic imaging resource guide. Rapport technique, Edmund Optics Ltd., Nether Popleton, York, U.K., 2010. (Citado en páginas [xxxii](#), [159](#) y [352](#).)
- [2] Varios AUTORES : ¿Qué es el acero inoxidable? Rapport technique, Euro Inox, Diamant Building, Bd. Aug. Ryers 80, 1030 Brussels, Belgium, 2002. (Citado en páginas [1](#) y [295](#).)
- [3] S. JIN et A. ATRENS : Passive Films on Stainless Steels in Aqueous Media. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 50(3):287–300, 1990. (Citado en página [1](#).)
- [4] D. T. LLEWELLYN et R. C. HUDD : *Steels: Metallurgy and Applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K., 3ª edición, 1998. (Citado en páginas [1](#), [2](#) y [295](#).)
- [5] A. E. COY ECHEVARRÍA : *Evaluación de la modificación de elementos en el comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos*. Thèse de doctorat, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Complutense de Madrid, España, 2006. (Citado en página [1](#).)
- [6] Various AUTHORS : Pickling and Passivating of Stainless Steel. Rapport technique, Euro Inox, Diamant Building, Bd. Aug. Ryers 80, 1030 Brussels, Belgium, 2007. (Citado en página [1](#).)
- [7] Various AUTHORS : ISSF Annual Review. Rapport technique, ISSF International Stainless Steel Forum, Rue Colonel Bourg 120, 1140 Brussels, Belgium, 2010. (Citado en páginas [1](#) y [315](#).)
- [8] S. CHENG, S. KUAN et W. TSAI : Effect of Water Vapor on Annealing Scale Formation on 316 SS. *Corrosion Science*, 48(3):634–649, 2006. (Citado en página [2](#).)
- [9] N. FUERTES-CASALS : Annealing oxides on duplex stainless steels. Mémoire de D.E.A., Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Stromdsund, Sweden, 2010. (Citado en página [2](#).)
- [10] M. F. MCGUIRE : *Stainless Steels for Design Engineers*. ASM International, Ohio, U.S.A., 1ª edición, 2008. (Citado en páginas [2](#), [4](#), [111](#) y [295](#).)
- [11] F. B. WAANDERS, S. W. VORSTER et A. ENGELBRECHT : Moessbauer and SEM Characterization of the Scale on Type 304 Stainless Steel. *Scripta Materialia*, 42(10): 997–1000, May. 2000. (Citado en páginas [3](#), [4](#), [111](#), [112](#) y [120](#).)
- [12] H. LI, Z. JIANG, K. A. TIEU et W. SUN : Analysis of Premature Failure of Work Rolls in a Cold Strip Plant. *Wear*, 263(7-12):1442–1446, Abr. 2007. (Citado en página [4](#).)
- [13] M. J. L. GINES, G. J. BENITEZ, T. PEREZ, E. MERLI, M. A. FIRPO et W. EGLI : Study of the Picklability of 1.8 mm Hot-Rolled Steel Strip in Hydrochloric Acid. *Latin American Applied Research*, 32(4):281–288, Dic. 2002. (Citado en página [4](#).)
- [14] J. G. LENARD : *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science, London, U.K., 1ª edición, 2002. (Citado en páginas [4](#) y [295](#).)

- [15] G. BERANGER, G. HENRY et G. SAIZ : *The Book of Steel*. Intercep Ltd., New York, NY, U.S.A., 1^a édition, 1996. (Citado en página 4.)
- [16] C. P. DILLON : *Corrosion Resistance of Stainless Steels (Corrosion Technology)*. CRC Press, New York, U.S.A., 1995. (Citado en página 4.)
- [17] A. MITAL, M. GOVINDARAJU et B. SUBRAMANI : A Comparison between Manual and Hybrid Methods in Parts Inspections. *Integrated Manufacturing Systems*, 9(6):344–349, 1998. (Citado en página 5.)
- [18] D. MARTÍN, E. VILLANUEVA et D. GUINEA : Prototipo para inspección de cascarilla basado en sensores fotoeléctricos. Rapport technique, Instituto de Automática Industrial (IAI-CSIC), Arganda del Rey, Madrid, España, 2003. (Citado en página 6.)
- [19] D. MARTÍN-GÓMEZ : *Arquitectura dinámica para inspección visual de superficies en tiempo real*. Thèse de doctorat, Departamento de Inteligencia Artificial de la UNED, Madrid, España, 2007. (Citado en páginas 6 y 177.)
- [20] D. MARTIN, D. GUINEA, M. GARCÍA-ALEGRE, E. VILLANUEVA et D. M. GUINEA : Multi-Modal Defect Detection of Residual Oxide Scale on a Cold Stainless Steel Strip. *Machine Vision and Applications*, 21(5):653–666, Abr. 2010. (Citado en páginas 6 y 121.)
- [21] E. R. DAVIES : *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, U.S.A., 3^a édition, Ene. 2005. (Citado en páginas 13, 24, 27, 42, 69 y 137.)
- [22] S. KALPAKJIAN et S. R. SCHMID : *Manufactura. Ingeniería y tecnología*. Prentice-Hall Inc., Naucalpan de Juárez, México, 4^a édition, 2002. (Citado en página 19.)
- [23] J. M. JURAN et A. BLANTON-GODFREY : *Juran's Quality Handbook*. McGraw-Hill, Columbus, OH, U.S.A., 5^a édition, 1998. (Citado en página 20.)
- [24] T. S. NEWMAN et A. K. JAIN : A Survey of Automated Visual Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(2):231–262, Mar. 1994. (Citado en páginas 20 y 28.)
- [25] J. M. BONELO-SÁNCHEZ : *Análisis de mapas de espesor en líneas de proceso de acero inoxidable*. Thèse de doctorat, Departamento de Ingeniería Industrial y Civil, Escuela Politécnica Superior, Algeciras, Cádiz, España, 2000. (Citado en páginas 21 y 295.)
- [26] J. M. CAÑERO-NIETO, C. G. SPÍNOLA, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO et M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Sistema Automático de Medida de Longitud de Chapas de Bobinas de Acero. In *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI11)*, número 1, pages 385–390, Badajoz, España, Jul. 2011. (Citado en páginas 21 y 45.)
- [27] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO et J. VIZOSO : Sistema de Visión para la Medida del Ancho de Bobinas de Acero. In *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI10)*, número 1, Bilbao, España, Jul. 2010. (Citado en páginas 21, 45 y 246.)
- [28] W. WINCHELL : *Inspection and Measurement in Manufacturing: Keys to Process Planning and Improvement*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, U.S.A., 1^a édition, 1996. (Citado en página 22.)

- [29] C. PLATERO-DUEÑAS : *Inspección automatizada de superficies homogéneas mediante visión artificial*. Thèse de doctorat, Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1998. (Citado en páginas [22](#), [23](#), [28](#), [59](#), [69](#), [121](#) y [321](#).)
- [30] P. D. T. O'CONNOR : *Practical Reliability Engineering*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, U.K., 3ª edición, 1995. (Citado en páginas [22](#) y [23](#).)
- [31] V. PIURI, F. SCOTTI et M. ROVERI : Computational Intelligence in Industrial Quality Control. *In Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing*, pages 4–9, Faro, Portugal, Sep. 2005. (Citado en página [22](#).)
- [32] T. YU et G. WANG : Research of On-line Process Quality Control System. *In IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL08)*, número 1, pages 351–356, Qingdao, China, Sep. 2008. (Citado en página [22](#).)
- [33] C. CHI et C. DRURY : Limits to Human Optimization in Inspection Performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 32(6):689–701, 2001. (Citado en página [23](#).)
- [34] X. JIANG, A. K. GRAMOPADHYE et B. J. MELLOY : Theoretical Issues in the Design of Visual Inspection Systems. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(3):232–247, 2004. (Citado en página [23](#).)
- [35] B. SMITH : Making War on Defects: Six-Sigma Design. *IEEE Spectrum*, 30(9):43–50, Sep. 1993. (Citado en página [23](#).)
- [36] A. MITAL, A. MOTORWALA, M. KULKARNI, M. SINCLAIR et C. SIEMIENIUCH : Allocation of functions to humans and machines in a manufacturing environment: Part i. *In Ergonomics Guidelines and Problem Solving*, volume 1, pages 33–59. Elsevier, 2001. (Citado en página [23](#).)
- [37] G. M. ZAMBRANO-REY, C. A. PARRA-RODRÍGUEZ, M. R. MANRIQUE-TORRES et C. J. BUSTACARA-MEDINA : Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (cim). *Ingeniería y Universidad*, 11(1):33–56, 2007. (Citado en página [23](#).)
- [38] M. SHIRVAIKAR : Trends in Automated Visual Inspection. *Journal of Real-Time Processing*, 1(1):41–43, Ago. 2000. (Citado en página [24](#).)
- [39] D. T. PHAM et R. J. ALCOCK : *Smart Inspection Systems: Techniques and Applications of Intelligent Vision*. Academic Press., Maryland Heights, MO 63043, U.S.A., Jun. 2003. (Citado en páginas [24](#), [30](#), [31](#) y [46](#).)
- [40] E. N. MALAMAS, E. G. M. PETRAKIS, M. ZERVAKIS, L. PETIT et J. D. LEGAT : A Survey on Industrial Vision Systems, Applications and Tools. *Image and Vision Computing*, 21(2):171–188, Jun. 2003. (Citado en páginas [25](#) y [46](#).)
- [41] M. L. SMITH et L. N. SMITH : Seeing is Believing in the Machine Vision Age. *Metal Powder Report*, 57(7):20–22, Jul. 2002. (Citado en página [26](#).)
- [42] B. G. BATCHELOR et P. F. WHELLAN : *Intelligent Vision Systems for Industry*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1ª edición, 1997. (Citado en páginas [30](#), [44](#) y [351](#).)
- [43] E. A. SILVER, R. V. VIDAL et D. de WERRA : A Tutorial on Heuristic Methods. *European Journal of Operational Research*, 5(3):153–162, Sep. 1980. (Citado en página [30](#).)

- [44] W. LIU : Real-Time Fault-Tolerant Control Systems. *In Expert Systems. The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century*, volume 1, pages 267–304. Academic Press, 2002. (Citado en página 31.)
- [45] Various AUTHORS : *Matlab Fuzzy Logic Toolbox 2. User's Guide*. The Mathworks Inc., Natick, MA, U.S.A., Mar. 2007. (Citado en página 32.)
- [46] B. JÄHNE, H. HAUBECKER et Peter GEIBLER : *Handbook of Computer Vision and Applications (Volume 2): Signal Processing and Pattern Recognition*. Academic Press, San Diego, CA, U.S.A., 1^a édition, 1999. (Citado en páginas 32 y 35.)
- [47] E. H. MAMDANI et S. ASSILIAN : An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1):1–13, Ene. 1975. (Citado en página 32.)
- [48] M. SUGENO : *Industrial Applications of Fuzzy Control*. Elsevier Science Ltd., Amsterdam, Netherlands, 1^a édition, 1985. (Citado en página 32.)
- [49] W. S. MCCULLOCH et W. PITTS : A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4):115–133, 1943. (Citado en página 34.)
- [50] D. O. HEBB : *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Wiley, Nueva York, NY, U.S.A., 1st édition, 1949. (Citado en página 34.)
- [51] F. ROSENBLATT : The Perceptron: a Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6):386–408, Nov. 1958. (Citado en página 34.)
- [52] B. WIDROW et M. E. HOFF : Adaptative Switching Circuits. *In 1960 IRE WESCON Convention Record*, volume 4, pages 96–104, Nueva York, NY, U.S.A., Ago. 1960. (Citado en página 34.)
- [53] M. MINSKY et S. A. PAPERT : *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. M.I.T. Press, Cambridge, MA, U.S.A., 1st édition, 1969. (Citado en página 34.)
- [54] T. KOHONEN et M. RUOHONEN : Representation of Associated Data by Matrix Operators. *IEEE Transactions on Computers*, 22(7):701–702, Jul. 1973. (Citado en página 34.)
- [55] T. KOHONEN : Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*, 43(1):59–69, Ene. 1982. (Citado en página 34.)
- [56] J. J. HOPFIELD : Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8):2554–2558, Abr. 1982. (Citado en página 34.)
- [57] J. J. HOPFIELD et D. W. TANK : Neural Computation of Decisions in Optimization Problems. *Biological Cybernetics*, 52(3):141–152, Jul. 1985. (Citado en página 34.)
- [58] R. C. EBERHART et Y. SHI : *Computational Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, Burlington, MA, U.S.A., 1^a édition, 2007. (Citado en página 34.)
- [59] R. D. REED et R. J. MARKS : *Neural Smithing: Supervised Learning in Feedforward Artificial Neural Networks*. M.I.T. Press Ltd., Cambridge, MA, U.S.A., 1st édition, 1999. (Citado en página 37.)

- [60] S. M. A. BURNEY, T. A. JILANI et C. ARDIL : A Comparison of First and Second Order Training Algorithms for Artificial Neural Networks. *International Journal of Computational Intelligence*, 1(3):431–441, Dic. 2004. (Citado en página 37.)
- [61] R. Florez LOPEZ et J. M. Fernandez FERNANDEZ : *Las redes neuronales artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. Netbiblo S. L., Rafael Alberti 6, La Coruña, España, 1ª edición, 2008. (Citado en página 37.)
- [62] Various AUTHORS : *Neural Network Toolbox 6. User's Guide*. The Mathworks Inc., Natick, MA, U.S.A., Mar. 2009. (Citado en páginas 37, 222 y 398.)
- [63] D. W. PATTERSON : *Artificial Neural Networks: Theory and Applications*. Prentice Hall, New Jersey, NY, U.S.A., 1st édition, 1998. (Citado en páginas 38 y 222.)
- [64] K. HORNIK, M. STINCHCOMBE et H. WHITE : Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*, 2(5):359–366, Mar. 1989. (Citado en páginas 38 y 222.)
- [65] R. SZELISKI : *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, London, U.K., 1ª edición, 2011. (Citado en páginas 40, 41 y 81.)
- [66] J. GONZÁLEZ-JIMÉNEZ : *Visión por computador*. Editorial Paraninfo, Magallanes 25, 28015 Madrid, España, 1999. (Citado en páginas 40, 159, 164 y 180.)
- [67] G. OLAGUE : Evolutionary Computer Vision. In *Proceedings of the Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO07)*, volume 1, pages 3458–3507, New York, NY, USA, Jul. 2007. ACM. (Citado en página 40.)
- [68] L. G. ROBERTS : Machine Perception of Three-Dimensional Objects. *Optical and Electro-optical Information Processing*, pages 159–197, 1966. (Citado en página 40.)
- [69] A. GUZMAN : Computer recognition of three-dimensional objects (mac-tr-59). Rapport technique, Massachusset Institute of Technology MIT, Cambridge, MA, U.S.A., 1968. (Citado en página 40.)
- [70] A. ROSENFELD : Picture Processing by Computer. *ACM Computing Survey*, 1(3):147–176, Sep. 1969. (Citado en página 40.)
- [71] R. M. HARALICK et L. G. SHAPIRO : Image Segmentation Techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29(1):100–132, Ene. 1985. (Citado en página 41.)
- [72] V. S. NALWA et T. O. BINFORD : On Detecting Edges. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6):699–714, Nov. 1986. (Citado en página 41.)
- [73] Y. G. LECLERC et S. W. ZUCKER : The Local Structure of Image Discontinuities in One Dimension. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-9(3):341–355, May. 1987. (Citado en página 41.)
- [74] A. ROSENFELD : Image Analysis and Computer Vision. *Computer Vision and Image Understanding*, 74(1):36–95, Abr. 1999. (Citado en página 41.)
- [75] B. JÄHNE, H. HAUBECKER et Peter GEIBLER : *Handbook of Computer Vision and Applications (Volume 3): Systems and Applications*. Academic Press, San Diego, CA, U.S.A., 1ª edición, 1999. (Citado en página 41.)

- [76] T. AKIYAMA, D. NISHIWAKI, E. ISHIDERA, K. KONDOH, M. HAYASHI et T. YAMAUCHI : Handwritten Address Interpretation System Allowing for Non-use of Postal Codes and Omission of Address Elements. *In Proceedings of the International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition IWFHR-9*, pages 527–532, Tokyo, Japón, Oct. 2004. (Citado en página 41.)
- [77] L. ZHENG, X. HE, B. SAMALI et L. T. YANG : Accuracy Enhancement for License Plate Recognition. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT10)*, pages 511–516, Bradford, West Yorkshire, U.K., Jul. 2010. (Citado en página 41.)
- [78] Y. WANG, Y. CUI, G. Q. HUANG, P. ZHANG et S. CHEN : Study on Fruit Quality Inspection based on its Surface Color in Procedure Logistics. *In IEEE International Conference on Manufacturing Automation (ICMA10)*, pages 107–111, Hong Kong, China, Dic. 2010. (Citado en página 41.)
- [79] S. GUNASEKARAN : Computer Vision Technology for Food Quality Assurance. *Trends in Food Science and Technology*, 7(8):245–256, Ago. 1996. (Citado en página 41.)
- [80] M. J. ISLAM, M. AHMADI et M. A. SID-AHMED : Image Processing Techniques for Quality Inspection of Gelatin Capsules in Pharmaceutical Applications. *In IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV08)*, pages 862–867, Singapore, Dic. 2008. (Citado en página 41.)
- [81] M. XU, M. ZHAO et C. ZHANG : Image Processing Method for Weld Quality Inspection System of Tailored Blanks Laser Welding. *In IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA10)*, volume 3, pages 422–426, Changsha, China, Mar. 2010. (Citado en página 41.)
- [82] J. L. BLANCO, J. A. FERNANDEZ-MADRIGAL et J. GONZALEZ : A New Approach for Large-Scale Localization and Mapping: Hybrid Metric-Topological SLAM. *In IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA07)*, pages 2061–2067, Roma, Italy, Abr. 2007. (Citado en página 41.)
- [83] R. GOTTSCHALK, X. P. BURGOS-ARTIZZU, A. RIBEIRO, G. PAJARES et A. SAINCHEZ-MIRALLES : Real-Time Image Processing for the Guidance of a Small Agricultural Field Inspection Vehicle. *In International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP08)*, pages 493–498, Auckland, New Zealand, Dic. 2008. (Citado en página 41.)
- [84] C. S. KIM et K. W. LEE : Image-based Robust Control of Robot Manipulators using Dynamic Compensator. *In IEEE American Control Conference (ACC10)*, pages 5266–5271, Baltimore, Maryland, U.S.A., Jul. 2010. (Citado en página 41.)
- [85] P. M. SVASTA et I. A. HAPENCIUC : Numerical Processing of Stereo Optical Images for Autonomous Navigation. *In IEEE Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC08)*, pages 639–644, London, U.K., Sep. 2008. (Citado en página 41.)
- [86] B. SIRMACEK et C. UNSALAN : Road Network Extraction using Edge Detection and Spatial Voting. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR10)*, volume 2, pages 3113–3116, Istanbul, Turkey, Ago. 2010. (Citado en página 42.)

- [87] F. XU et Y. JI : Automatic Reconstruction of Building Objects from Multiaspect Meter-Resolution SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7):2336–2353, Jul. 2007. (Citado en página 42.)
- [88] P. DEBEVEC, C. TAYLOR, J. MALIK, G. LEVIN, G. BORSHUKOV et Y. YU : Imaged-based modeling and rendering of architecture with interactive photogrammetry and view-dependent texture mapping. *In Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS98)*, volume 5, pages 514–517, Monterey, CA, U.S.A., May. 1998. (Citado en página 42.)
- [89] D. E. BECKER, J. N. TURNER, H. TANENBAUM et B. ROYSAM : Real-Time Image Processing Algorithms for an Automated Retinal Laser Surgery System. *In IEEE International Conference on Image Processing (ICIP95)*, volume 1, pages 426–429, Washington, DC, U.S.A., Oct. 1995. (Citado en página 42.)
- [90] Y. WANG, X. GU, T. F. CHANG et P. M THOMSON : Shape Analysis with Conformal Invariants for Multiply Connected Domains and its Application to Analyzing Brain Morphology. *In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR09)*, pages 202–209, Miami, Florida, U.S.A., Jun. 2009. (Citado en página 42.)
- [91] J. M. MOLINA, M. J. MARTIN, P. ISASI et A. SANCHIS : A Fuzzy Reasoning System for Boundary Detection in Radiological Images. *In IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings (FUZZ-IEEE98)*, volume 2, pages 1524–1529, Anchorage, Alaska, U.S.A., May. 1998. (Citado en página 42.)
- [92] M. VIDAL, J. PINEYRO, R. ALVARADO et R. CALLUPE : Quantitative Tool Design using Tomographic Brain Image Processing from SPECT to support Psychiatric Diagnosis. *In Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS06)*, pages 2770–2773, New York, NY, U.S.A., Sep. 2006. (Citado en página 42.)
- [93] T. ABE, C. HAMADA et T. KINOSHITA : Chromosome Region Recognition based on Local Band Patterns. *In IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE08)*, pages 1–6, Atenas, Grecia, Oct. 2008. (Citado en página 42.)
- [94] W. SHITONG et W. MIN : A New Detection Algorithm NDA based on Fuzzy Cellular Neural Networks for White Blood Cell Detection. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedecine*, 10(1):5–10, Ene. 2006. (Citado en página 42.)
- [95] S. T. C. WONG : High Content Cellular Analysis and their Applications. *In Proceeding of the IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference (CSB04)*, page 8, Stanford, CA, U.S.A., Ago. 2004. (Citado en página 42.)
- [96] R. GARELLO : Signal and Image Processing Applications in Radar Ocean Observations. *In IEEE International Conference on Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA10)*, pages 810–818, Kuala Lumpur, Malaysia, May. 2010. (Citado en página 42.)
- [97] D. GUZZI, A. BARDUCCI, P. MARCOIONNI et I. PIPPI : An Atmospheric Correction Iterative Method for High Spectral Resolution Aerospace Imaging Spectrometers. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS09)*, volume 2, pages 73–76, Cape Town, South Africa, Jul. 2009. (Citado en página 42.)

- [98] L. BANDEIRA, J. SARAIVA et P. PINA : Impact Recognition on Mars based on a Probability Volume created by Template Matching. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12):4008–4015, Dic. 2007. (Citado en página 42.)
- [99] M. MASOOD-UR-REHMAN, F. JIANCHENG, F. SAFFIH et Q. WEI : Automatic Star Pattern Recognition in Tracking Mode. In *IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST09)*, pages 249–252, Islamabad, Pakistan, Ene. 2009. (Citado en página 42.)
- [100] L. GUANG-YU et W. LEI : Recognition for Driving Across Central-Line of On-Board Information Image Monitoring System. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA09)*, pages 4991–4996, Chanchung, China, Ago. 2009. (Citado en página 42.)
- [101] C. C. FUNG et N. JERRAT : A Neural Network based Intelligent Intruders Detection and Tracking System using CCTV Images. In *TENCON 2000*, volume 2, pages 409–414, Kuala Lumpur, Malaysia, Ago. 2000. (Citado en página 42.)
- [102] X. CHAO et F. ZHIYONG : Facial Expression Recognition and Synthesis on Affective Emotions Composition. In *International Seminar on Future BioMedical Information Engineering (FBIE08)*, pages 144–147, Wuhan, Hubei, China, Dec. 2008. (Citado en página 42.)
- [103] K. ZHANG, J. SHE, M. GAO et W. MA : Study on the Embedded Fingerprint Image Recognition System. In *IEEE International Conference of Information Science and Management Engineering (ISME10)*, volume 2, pages 169–172, Xian, China, Ago. 2010. (Citado en página 42.)
- [104] R. S. CHORAS : Hybrid Iris and Retina Recognition for Biometrics. In *IEEE International Congress on Image and Signal Processing (CISP10)*, volume 5, pages 2422–2426, Yantai, China, Oct. 2010. (Citado en página 42.)
- [105] I. HARRISON et D. LUPTON : Automatic Road Traffic Event Monitoring Information System ARTEMIS. In *IEEE Seminar on CCTV and Road Surveillance*, pages 1–4, London, U.K., May. 1999. (Citado en página 42.)
- [106] J. ZHAO, Y. WEI, S. XIA et Z. WANG : Estimating Human Body Segment Parameters using Motion Capture Data. In *IEEE International Universal Communication Symposium (IUCS10)*, pages 243–249, Beijing, China, Oct. 2010. (Citado en página 42.)
- [107] J. W. BRANCH et G. OLAGUE : La visión por computador. una aproximación al estado del arte. *Dyna*, 68(133):1–16, Jun. 2001. (Citado en página 43.)
- [108] M. L. SMITH et L. N. SMITH : Editorial: Special Issue on Machine Vision. *Computers in Industry*, 56(8):773–776, Dic. 2005. (Citado en página 44.)
- [109] A. HORNBERG : *Handbook of Machine Vision*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA, Weinheim, Germany, 1ª edición, 2006. (Citado en páginas 44, 51, 67, 69, 70, 71, 140, 141, 159, 171, 174, 175, 176, 178, 185 y 196.)
- [110] Z. LIU, H. UKIDA, P. RAMUALI et D. FORSYTH : Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: a Special Issue on Machine Vision and Applications. *Machine Vision and Applications*, 21(5):597–599, Dic. 2010. (Citado en página 44.)

- [111] Q. QI et R. DU : A Vision based Micro-assembly System for Assembling Components in Mechanical Watch Movements. *In IEEE International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT10)*, pages 1–5, Toronto, Canada, Oct. 2010. (Citado en página 44.)
- [112] G. ZHAO, Y. JIA et Z. OU : Construction of Vision-based Manipulation System for 3D Industrial Objects. *In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO09)*, pages 1051–1056, Guilin, Guangxi, China, Dic. 2009. (Citado en página 44.)
- [113] M. M. CHETIMA et P. PAYEUR : Feature Selection for a Real-time Vision-based Food Inspection System. *In IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments (ROSE08)*, pages 120–125, Ottwa, Canada, Oct. 2008. (Citado en página 44.)
- [114] Z. SHUANGYANG : Fast Inspection of Food Packing Seals using Machine Vision. *In IEEE International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA10)*, volume 1, pages 724–726, ChangSha, China, Dic. 2010. (Citado en página 44.)
- [115] Z. HOCENSKI, T. KESER et A. BAUMGARTNER : A Simple and Efficient Method for Ceramic Tile Surface Defects Detection. *In IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE07)*, pages 1606–1611, Vigo, España, Jun. 2007. (Citado en página 44.)
- [116] T. S. YAN et D. W. CUI : The Method of Intelligent Inspection of Product Quality Based on Computer Vision. *In International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design (CAIDCD06)*, pages 1–6, Hangzhou, China, Nov. 2006. (Citado en página 44.)
- [117] F. ADAMO, F. ATTIVISMO, A. Di NISIO et M. SAVINO : An Online Defects Inspection System for Satin Glass Based on Machine Vision. *In IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC09)*, pages 288–293, Singapore, May. 2009. (Citado en página 44.)
- [118] S. JAYAKUMAR et R. KANNA : Inspection System for Detecting Defects in a Transistor using Artificial Neural Networks. *In IEEE International Conference on Communication and Computational Intelligence (INCOCCI10)*, pages 76–81, Erode, Tamil Nadu, India, Dic. 2010. (Citado en página 44.)
- [119] S. M. KIM, Y. C. LEE et S. C. LEE : Vision Based Automatic Inspection System for Nuts Welded on the Support Hinge. *In International Joint Conference (SICE-ICASE10)*, pages 1508–1512, Busan, Korea, Oct. 2006. (Citado en página 44.)
- [120] J. KILLING, B. W. SURGENOR et C. K. MECHEFSKE : A Neuro-fuzzy Approach to Machine Vision Based Parts Inspection. *In Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS06)*, pages 696–701, Montreal, Canada, Jun. 2006. (Citado en página 44.)
- [121] P. ABRIAL, Y. L. MENESES et P. BHATIA : Color Detection for Vision Machine Defect Inspection on Electronic Devices. *In IEEE International Electronic Manufacturing Technology Symposium (IEMT10)*, pages 1–3, Melaka, Malaysia, Dic. 2010. (Citado en página 44.)

- [122] Y. HAWARI, M. J. SALAMI et A. A. ABURAS : Fuzzy Based Technique for Microchip Lead Inspection using Machine Vision. *In International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE08)*, pages 1222–1226, Kuala Lumpur, Malaysia, May. 2008. (Citado en página 44.)
- [123] D. PERNG, C. CHOU et W. CHEN : A Novel Vision System for CRT Panel Auto-inspection. *In IEEE International Conference on Mechatronics (ICM05)*, pages 622–625, Taipei, Taiwan, Jul. 2005. (Citado en página 44.)
- [124] W. KIM, J. OH, Y. CHUNG, I. CHOI et K. PARK : The Detection of Curve-type Defects in the TFT-LCD Panels with Machine Vision. *In IEEE Region 10 (TENCON05)*, pages 1–5, Melbourne, Victoria, Australia, Nov. 2005. (Citado en página 44.)
- [125] J. W. KWON, Y. Y. CHOO, H. H. CHOI, J. M. CHO et G. S. KIL : Development of Leather Quality Discrimination System by Texture Analysis. *In IEEE Region 10 (TENCON04)*, volume 1, pages 327–330, Chiang Mai, Thailand, Nov. 2004. (Citado en página 44.)
- [126] L. WANG, Y. DING et Z. HAN : Defects Detection in Web Inspection Based on DM642 DSP. *In International Forum on Computer Science-Technology and Applications (IFCSTA09)*, volume 1, pages 413–417, Chongqin, China, Dic. 2009. (Citado en página 44.)
- [127] G. ACCIANI, G. BRUNETTI et G. FORNARELLI : Application of Neural Networks in Optical Inspection and Classification of Solder Joints in Surface Mount Technology. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2(3):200–209, Ago. 2006. (Citado en página 45.)
- [128] M. M. VALENTIN, P. DAN et C. GABRIEL : Automated Optical Inspection Tool using the LPKP PCB Mechanical Prototyping Machine. *In Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC08)*, pages 1359–1362, Greenwich, U.K., Sep. 2008. (Citado en página 45.)
- [129] W. J. ZHANG, D. LI, F. YE et H. SUN : Automatic Optical Defect Inspection and Dimension Measurement of Drill Bit. *In IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA06)*, pages 95–100, Luoyang, China, Jun. 2006. (Citado en página 45.)
- [130] Y. LI, Y. F. LI, Q. L. WANG, D. XU et M. TAN : Measurement and Defect Detection of the Weld Bead Based on Online Vision Inspection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(7):1842–1849, Jul. 2010. (Citado en página 45.)
- [131] S. LU, X. ZHANG et Y. KUANG : An Integrated Inspection Method based on Machine Vision for Solder Paste Depositing. *In IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA07)*, pages 137–141, Guangzhou, China, Jun. 2007. (Citado en página 45.)
- [132] K. GE-WEN et L. HONG-BING : Surface Defects Inspection of Cold-rolled Strips Based on Neural Networks. *In Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC05)*, volume 8, pages 5034–5037, Guangzhou, China, Ago. 2005. (Citado en página 45.)
- [133] J. HONGBIN, Y. MURPHEY, S. JIANJUNG et T. CHANG : An Intelligent Real-Time Vision System for Surface Defect Detection. *In IEEE International Conference on*

- Pattern Recognition (ICPR04)*, volume 3, pages 239–242, Ago. 2004. (Citado en página 45.)
- [134] W. XIU-YONG, X. KE et X. JIN-WU : Application of Undecimated Wavelet Transform to Surface Defect Detection of Hot Rolled Steel Plates. *In IEEE Congress on Image and Signal Processing (CISP08)*, número 4, pages 528–532, Sanya, China, May. 2008. (Citado en páginas 45, 103 y 104.)
- [135] M. SHARIFZADEH, S. ALIREZAEI, R. AMIRFATTAHI et S. SADRI : Detection of Steel Defect Using the Image Processing Algorithms. *In IEEE International Multitopic Conference (INMIC08)*, pages 125–127, Karachi, Pakistan, Dic. 2008. (Citado en páginas 45, 103 y 104.)
- [136] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO et M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Real-Time Image Processing for Edge Inspection and Defects Detection in Stainless Steel Production Lines. *In IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST11)*, pages 170–175, Batu Ferringhi, Penang, Malaysia, May. 2011. (Citado en páginas 45 y 246.)
- [137] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO et M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Continuous Real-Time Optical Measuring of Strip Width and Edge Inspection in Stainless Steel Production Lines. *In IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC11)*, número 1, pages 1–4, Binjiang, Hangzhou, China, May. 2011. (Citado en páginas 45 y 246.)
- [138] R. AHMED et M. P. F. SUTCLIFFE : Identification of Surface Features on Cold-rolled Stainles Steel Strip. *Wear*, 244(1-2):60–70, 2000. (Citado en página 45.)
- [139] M. YAZDCHI, M YAZDI et A. G. MAHYARI : Steel Surface Defect Detection Using Texture Segmentation Based on Multifractal Dimension. *In IEEE International Conference on Digital Image Processing (ICDIP09)*, número 1, pages 346–350, Bangkok, Thailand, Mar. 2009. (Citado en páginas 45, 102, 103 y 104.)
- [140] C. FERNÁNDEZ, C. PLATERO, P. CAMPOY et R. ARACIL : Vision System for On-line Surface Inspection in Aluminium Casting Process. *In Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON93)*, volume 3, pages 1854–1859, Maui, U.S.A., Nov. 1993. (Citado en página 45.)
- [141] X. ZHANG, R. LIANG, J. C. DING, D. DUAN et G. ZONG : The System of Copper Strips Surface Defects Inspection Based on Intelligent Fusion. *In IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL08)*, número 1, pages 476–480, Qingdao, China, Sep. 2008. (Citado en páginas 45 y 106.)
- [142] J. M. CAÑERO-NIETO, C. G. SPÍNOLA, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO, F. GARCÍA-VACAS, S. ESPEJO, J. VIZOSO et G. HYLANDER : Detección y Medida del óxido Residual en Líneas de Producción de Acero Inoxidable Mediante Técnicas de Procesamiento de Imágenes. *In Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI10)*, número 1, Bilbao, España, Jul. 2010. (Citado en página 45.)
- [143] J. M. CAÑERO-NIETO, C. G. SPÍNOLA, G. MORENO-ARANDA, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ et J. M. BONELO : Continuous Real-Time Optical Measuring of Strip Width and Edge Inspection in Stainless Steel Production Lines. *Journal of Pattern Recognition and Intelligent Systems*, 3(2):16–28, May. 2015. (Citado en páginas 45 y 246.)

- [144] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, G. MORENO-ARANDA, J. M. BONELO et M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ : Contactless Real-Time Measuring System for the Length of Sheets in Stainless Steel Production Lines. *In IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC12)*, número 1, pages 2295–2299, Graz, Austria, May. 2012. (Citado en página 45.)
- [145] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO, S. ESPEJO, S. MORILLAS et J. M. MARTÍN-VÁZQUEZ : Residual Oxides Detection and Measurement in Stainless Steel Production Lines. *In IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurements Systems and Applications (CIMS09)*, número 1, pages 76–79, Hong-Kong, China, May. 2009. (Citado en página 45.)
- [146] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO, S. ESPEJO, S. MORILLAS et J. M. MARTÍN-VÁZQUEZ : Procesamiento de Imágenes para la Detección de óxidos Residuales en Líneas de Producción de Laminados Metálicos. *In Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI08)*, número 1, pages 951–956, Cartagena, España, Sep. 2008. (Citado en página 45.)
- [147] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, J. M. BONELO, F. GARCÍA-VACAS, G. MORENO-ARANDA, S. ESPEJO, G. HYLANDER et J. VIZOSO : Image Processing for Surface Quality Control in Stainless Steel Production Lines. *In IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST10)*, número 1, pages 192–197, Thessaloniki, Grecia, Jul. 2010. (Citado en página 45.)
- [148] A. AYANI, A. LAGO, A. CRUZ et J. A. GUTIERREZ : Surface Inspection of Hot Rolled Seamless Tube. *Chernye Metally: Ferrous Metals*, 1(4):76–80, Abr. 2009. (Citado en página 45.)
- [149] C. S. CHO, B. M. CHUNG et M. J. PARK : Development of Real-time Vision-based Fabric Inspection System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4):1073–1079, Ago. 2005. (Citado en página 45.)
- [150] D. WANG et R. HU : Image Segmentation Algorithm for Cord Fabric Defects Inspection Based on Machine. *In IEEE International Conference on Information Science and Engineering (ICISE09)*, pages 1298–1302, Nanjing, China, Dic. 2009. (Citado en página 45.)
- [151] W. YANG, D. LI, X. WEI, Y. KANG et F. LI : An Automated Visual Inspection System for Foreign Fiber Detection in Lint. *In WRI Global Congress on Intelligent Systems (GCIS09)*, pages 364–368, Xiamen, China, May. 2009. (Citado en página 45.)
- [152] V. PIURI, F. SCOTTI et M. ROVERI : Visual Inspection of Particle Boards for Quality Assessment. *In IEEE International Conference on Image Processing (ICIP05)*, volume 3, pages 521–524, Genoa, Italy, Sep. 2005. (Citado en página 45.)
- [153] G. A. RUZ, P. A. ESTEVEZ et P. A. RAMIREZ : Automated Visual Inspection System for Wood Defect Classification using Computational Intelligence Techniques. *International Journal of Systems Science*, 40(2):163–172, Feb. 2009. (Citado en página 45.)
- [154] Z. ZHENGTAO, L. HUANG et Y. XIONGYI : Pre-procesing Techniques for On-line Capsule Inspection Based on Machine Vision. *In IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA11)*, volume 2, pages 653–656, Shenzhen, Guangdong, China, Mar. 2011. (Citado en página 45.)

- [155] L. W. TECK, M. SULAIMAN et H. N. SHAH : Flexible Approach for Region of Interest Creation for Shape-based Matching in Vision System. *In IEEE Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA09)*, pages 205–208, Monash, Malaysia, Jul. 2009. (Citado en página 45.)
- [156] E. DOMÍNGUEZ, C. G. SPÍNOLA, R. LUQUE, E. PALOMO et J. MUÑOZ : Object Recognition and Inspection in Difficult Industrial Environments. *In IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT06)*, pages 989–993, Dic. 2006. (Citado en página 45.)
- [157] A. ZAKI et M. ESKANDER : Spray Painting of a General Three-Dimensional Surface. *In IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS00)*, volume 3, pages 2172–2177, Takamatsu, Japón, Oct. 2000. (Citado en página 45.)
- [158] Y. CHENG et M. A. JAFARI : Vision-Based Online Process Control in Manufacturing Applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 5(1):140–153, Ene. 2008. (Citado en página 45.)
- [159] Z. HAIMING et Y. XICHEN : Visual Servo in Laser Remanufacturing Robot. *In IEEE International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE10)*, pages 3883–3886, Wuhan, China, Jun. 2010. (Citado en página 45.)
- [160] J. K. OH et C. H. LEE : Development of a Stereo Vision System for Industrial Robots. *In IEEE International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS07)*, pages 659–663, Seoul, Korea, Oct. 2007. (Citado en página 45.)
- [161] M. J. MARTÍN-VÁZQUEZ, C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, J. M. BONELO et J. VIZOSO : Sistema de Visión Artificial para la Detección de Soldaduras en Tiempo Real en Líneas de Proceso de Acero Inoxidable. *In Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI09)*, número 1, pages 2345–2356, Leganés, España, Jul. 2009. (Citado en páginas 45 y 251.)
- [162] A. RYBERG, M. ERICSSON, A. K. CHRISTIANSSON, K. ERIKSSON, J. NILSSON et M. LARSSON : Stereo Vision for Path Correction in Off-line Programmed Robot Welding. *In IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT10)*, pages 1700–1705, Viña del Mar, Chile, Mar. 2010. (Citado en página 45.)
- [163] P. THAMILARASI et S. RAGUNATHAN : Study on the Effect of Machine Vision in Real Time Application Robot Welding. *In IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC10)*, pages 1–5, Tamilnadu, India, Dec. 2010. (Citado en página 45.)
- [164] F. CANAL, J. G. MATEOS et E. CARASUSAN : Fast Optical Inspection of Metal Forming Processes in Car Industry. *In IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT05)*, pages 975–980, Hong Kong, China, Dic. 2005. (Citado en página 45.)
- [165] L. CHEN, Y. LIANG et K. WANG : Inspection of Rail Surface Defect based on Machine Vision System. *In IEEE International Conference on Information Science and Engineering (ICISE10)*, pages 3793–3797, Hangzhou, China, Dic. 2010. (Citado en página 45.)
- [166] J. H. LEE, J. M. LEE, J. H. KIM et Y. S. MOON : Machine Vision System for Automatic Inspection of Bridges. *In Congress on Image and Signal Processing*

- (*CISP08*), volume 3, pages 363–366, Sanya, Hainan, China, May. 2008. (Citado en página 45.)
- [167] R. DILLMANN, S. VOGT et A. ZILKER : Data Reduction for Optical 3D-Inspection in Automotive Application. In *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI99)*, pages 159–164, Taipei, Taiwan, Ago. 1999. (Citado en página 45.)
- [168] L. YUE et L. XIANYONG : Automated Optical Inspection Tool using the LPKP PCB Mechanical Prototyping Machine. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM09)*, pages 1089–1092, Beijing, China, Oct. 2009. (Citado en página 45.)
- [169] A. ROSENFELD : Machine Vision for Industry: Tasks, Tools and Techniques. *Image and Vision Computing*, 3(3):122–135, Ago. 1985. (Citado en página 45.)
- [170] I. ANDREADIS : Techniques and Applications of Automated Visual Inspection Systems. In *Expert Systems. The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century*, volume 3, pages 771–800. Academic Press, 2002. (Citado en página 45.)
- [171] S. K. KOPPARAPU : Lighting Design for Machine Vision Application. *Image and Vision Computing*, 24(7):720–726, Jul. 2006. (Citado en página 45.)
- [172] H. GOLNABI et A. ASADPOUR : Design and Application of Industrial Machine Vision Systems. *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6):630–637, Mar. 2007. (Citado en página 48.)
- [173] G. PAJARES et J. M. De la CRUZ : *Visión por computador. Imágenes digitales y aplicaciones*. RA-MA, Madrid, España, 1^a édition, 2001. (Citado en páginas 49, 80, 83, 92 y 96.)
- [174] S. J. KEIROUZ : Opening New Doors with Color Machine Vision, Oct. 1998. [Online]. Available: <http://www.qualitydigest.com/oct98/html/color.html>. (Citado en página 61.)
- [175] How do I calculate the Bandwidth for my image acquisition?, May. 2011. [Online]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/42494AA78B6AB0AC86257948006B4D51?OpenDocument>. (Citado en página 62.)
- [176] A. V. BHAVSAR et A. N. RAJAGOPALAN : Depth Estimation with a Practical Camera. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, pages 1–11, Manchester, U.K., Sep. 2009. (Citado en página 67.)
- [177] B. JÄHNE, H. HAUBECKER et Peter GEIBLER : *Handbook of Computer Vision and Applications (Volume 1): Sensors and Imaging*. Academic Press, San Diego, CA, U.S.A., 1^a édition, 1999. (Citado en página 67.)
- [178] A. De la ESCALERA HUESO : *Visión por computador. Fundamentos y métodos*. Prentice-Hall, Madrid, España, 1^a édition, 2003. (Citado en páginas 67, 70, 79, 92, 96, 159, 321 y 322.)
- [179] A. NOVINI : Fundamentals of Machine Vision Lighting. In *Proceedings of the WESCON 93 Conference Record*, pages 44–52, San Francisco, CA, U.S.A., Sep. 1993. (Citado en páginas 69 y 184.)

- [180] R. C. GONZÁLEZ et R. E. WOODS : *Digital Image Processing*. Prentice Hall, New Jersey, NJ, U.S.A., 2002. (Citado en páginas 75, 79, 80, 83, 92 y 96.)
- [181] A. M. KHAN et S. RAVI : Image Segmentation Methods: A Comparative Study. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3(4):84–92, Sep. 2013. (Citado en páginas 75 y 83.)
- [182] M. NAGAO et T. MATSUYAMA : Edge Preserving Smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, 9(4):394–407, 1979. (Citado en página 80.)
- [183] W. K. PRATT : *Digital Image Processing*. John Wiley and Sons, New York, U.S.A., 2ª edición, 2001. (Citado en páginas 83, 158, 203 y 232.)
- [184] M. SONKA, V. HLAVAC et R. BOYLE : Segmentation. In *Imagen Processing, Analysis and Machine Vision*, pages 112–191. Springer U.S., 1993. (Citado en página 83.)
- [185] J. L. SEMMLOW : *Biosignal and Medical Image Processing*. CRC-Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 2nd édition, 2009. (Citado en páginas 84, 96, 107 y 108.)
- [186] P. K. SAHOO, S. SOLTANI et A. K. WONG : A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 41:233–260, 1988. (Citado en página 84.)
- [187] M. SEUL, L. O’GORMAN et M. J. SAMMON : *Practical Algorithms for Image Analysis. Description, Examples and Code*. The Press Syndicate of the University of Cambridge, Cadbridge, U.K., 1st édition, 2001. (Citado en página 85.)
- [188] M. SEZGIN et B. SANKUR : Selection of Thresholding Methods for Non-Destructive Testing Applications. In *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 764–767, Thessaloniki, Grecia, Oct. 2001. (Citado en página 85.)
- [189] M. SEZGIN et B. SANKUR : Survey Over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):146–165, Ene. 2004. (Citado en página 85.)
- [190] J. S. WESZKA et A. ROSENFELD : Histogram Modification for Threshold Selection. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9(1):38–52, Ene. 1979. (Citado en página 85.)
- [191] L. HALADA et G. A. OSOKOV : Histogram Concavity Analysis by Quasicurvature. *Computers and Artificial Intelligence*, 6:523–533, Abr. 1987. (Citado en página 85.)
- [192] A. ROSENFELD et P. DE-LA-TORRE : Histogram Concavity Analysis as an Aid in Threshold Selection. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13(3):231–235, Abr. 1983. (Citado en página 85.)
- [193] S. C. SAHASRABUDHE et K.S. GUPTA : A Valley-seeking Threshold Selection Technique. In L. SHARIRO et A. ROSENFELD, éditeurs : *Computer Vision and Image Processing*, chapitre 1, pages 55–65. Academic Press Inc., 1ª édition, 1992. (Citado en página 85.)
- [194] J. S. WESZKA et A. ROSENFELD : Threshold Evaluation Techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8(8):622–629, Ago. 1978. (Citado en página 85.)

- [195] R. J. WHATMOUGH : Automatic Threshold Selection from a Histogram Using the Exponential Hull. *Graphical Models and Image Processing*, 53(6):592–600, Nov. 1991. (Citado en página 85.)
- [196] M. I. SEZAN : A Peak Algorithm and its Application to Histogram-Based Image Data Reduction. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 49(1):36–51, Ene. 1990. (Citado en página 85.)
- [197] S. BOUKHAROUBA, J. M. REBORDAO et P. L. WENDEL : An Amplitude Segmentation Method Based on the Distribution Function of an Image. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 29(1):47–59, Ene. 1985. (Citado en página 85.)
- [198] M. J. CARLOTTO : Histogram Analysis Using a Scale-Space Approach. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(1):121–129, Ene. 1987. (Citado en página 85.)
- [199] J. C. OLIVO : Automatic Threshold Selection Using the Wavelet Transform. *Graphical Models and Image Processing*, 56(3):205–218, May. 1994. (Citado en página 85.)
- [200] D. TSAI : A Fast Thresholding Selection Procedure for Multimodal and Unimodal Histograms. *Pattern Recognition Letters*, 16(6):653–666, Jun. 1995. (Citado en página 85.)
- [201] T. KAMPKE et R. KOBER : Nonparametric Optimal Binarization. In *14th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 27–29, Brisbane, Australia, Ago. 1998. (Citado en página 85.)
- [202] N. RAMESH, J. H. YOO et I. K. SETHI : Thresholding Based on Histogram Approximation. *IEEE Proceedings Vision, Image and Signal Processing*, 142(5):271–279, Oct. 1995. (Citado en páginas 85 y 86.)
- [203] J. CAI et Z. Q. LIU : A New Thresholding Algorithm Based on All-Pole Model. In *14th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 34–36, Brisbane, Australia, Ago. 1998. (Citado en página 85.)
- [204] R. GUO et S. M. PANDIT : Automatic Threshold Selection Based on Histogram Modes and Discriminant Criterion. *Machine Vision and Applications*, 10(5-6):331–338, Abr. 1998. (Citado en páginas 85 y 88.)
- [205] C. K. LEUNG et F. K. LAM : Performance Analysis for a Class of Iterative Image Thresholding Algorithms. *Pattern Recognition*, 29(9):1523–1530, Sep. 1996. (Citado en página 86.)
- [206] T. W. RIDLER et S. CALVARD : Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 8(8):630–632, Ago. 1978. (Citado en página 86.)
- [207] H. J. TRUSSELL : Comments on Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 9(5):311, May. 1979. (Citado en página 86.)
- [208] M. K. YANNI et E. HORNE : A New Approach to Dynamic Thresholding. In *7th European Signal Processing Conference (EUSIPCO94)*, volume 1, pages 34–44, Edinburgo, U. K., Sep. 1994. (Citado en página 86.)

- [209] N. OTSU : A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 9(1):62–66, Ene. 1979. (Citado en página 86.)
- [210] F. R. DIAS-VELASCO : Thresholding Using the ISODATA Clustering Algorithm. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 10(11):771–774, Nov. 1980. (Citado en página 86.)
- [211] H. LEE et R. H. PARK : Comments on An Optimal Multiple Threshold Scheme for Image Segmentation. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 20(3):741–742, May. 1990. (Citado en página 86.)
- [212] J. Z. LIU et W. Q. LI : The Automatic Thresholding of Gray-Level Pictures via Two-Dimensional Otsu Method. *Acta Automatica Sinica*, 19(1):101–105, Ene. 1993. (Citado en páginas 86 y 88.)
- [213] D. E. LLOYD : Automatic Target Classification Using Moment Invariant of Image Shapes. Rapport technique, RAE IDN AW126, Farnborough, U.K., 1985. (Citado en página 86.)
- [214] J. KITTLER et J. ILLINGWORTH : On Threshold Selection Using Clustering Criteria. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 15(5):652–655, Sep. 1985. (Citado en página 86.)
- [215] J. KITTLER et J. ILLINGWORTH : Minimum Error Thresholding. *Pattern Recognition*, 19(1):41–47, Ene. 1986. (Citado en página 86.)
- [216] S. CHO, R. HARALICK et S. YI : Improvement of Kittler and Illingworths Minimum Error Thresholding. *Pattern Recognition*, 22(5):609–617, Sep. 1989. (Citado en página 86.)
- [217] C. V. JAWAHAR, P. K. BISWAS et A. K. RAY : Investigations on Fuzzy Thresholding Based on Fuzzy Clustering. *Pattern Recognition*, 30(10):1605–1613, Oct. 1997. (Citado en página 86.)
- [218] T. PUN : A New Method for Gray-Level Picture Threshold Using the Entropy of the Histogram. *Signal Processing*, 2(3):223–237, Jul. 1980. (Citado en página 87.)
- [219] T. PUN : Entropic Thresholding, A New Approach. *Computer Graphics and Image Processing*, 16(3):210–239, Jul. 1981. (Citado en página 87.)
- [220] J. N. KAPUR, P. K. SAHOO et A. K. WONG : A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 29(3):273–285, Mar. 1985. (Citado en página 87.)
- [221] J. C. YEN, F. J. CHANG et S. CHANG : A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 4(3):370–378, Mar. 1995. (Citado en página 87.)
- [222] P. SAHOO, C. WILKINS et J. YEAGER : Threshold Selection Using Renyis Entropy. *Pattern Recognition*, 30(1):71–84, Jan. 1997. (Citado en página 87.)
- [223] C. H. LI et C. K. LEE : Minimum Cross Entropy Thresholding. *Pattern Recognition*, 26(4):617–625, Abr. 1993. (Citado en página 87.)

- [224] C. H. LI et P. K. TAM : An Iterative Algorithm for Minimum Cross Entropy Thresholding. *Pattern Recognition Letters*, 19(8):771–776, Jun. 1998. (Citado en página 87.)
- [225] A. D. BRINK et N. E. PENDOCK : Minimum Cross-Entropy Threshold Selection. *Pattern Recognition*, 29(1):179–188, Ene. 1996. (Citado en página 87.)
- [226] N. PAL : On Minimum Cross-Entropy Thresholding. *Pattern Recognition*, 29(4):575–580, Abr. 1996. (Citado en página 87.)
- [227] A. C. WONG et P. K. SAHOO : A Grey-Level Threshold Selection Method Based on Maximum Entropy Principle. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics*, 19(4):866–871, Jul. 1989. (Citado en página 87.)
- [228] A. G. SHANBHAG : Utilization of Information Measure as a Means of Image Thresholding. *Graphical Models and Image Processing*, 56(5):414–419, Sep. 1994. (Citado en página 87.)
- [229] H. D. CHENG, Y. H. CHEN et Y. SUN : A Novel Fuzzy Entropy Approach to Image Enhancement and Thresholding. *Signal Processing*, 75(3):277–301, Jun. 1999. (Citado en páginas 87 y 88.)
- [230] W. H. TSAI : Moment-Preserving Thresholding: A New Approach. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 29(3):377–393, Mar. 1985. (Citado en página 87.)
- [231] S. C. CHENG et W. H. TSAI : A Neural Network Implementation of the Moment-Preserving Technique and Its Application to Thresholding. *IEEE Transactions On Computers*, 42(4):501–507, Abr. 1993. (Citado en página 87.)
- [232] E. J. DELP et O. R. MITCHELL : Moment Preserving Quantization. *IEEE Transactions On Communications*, 39(11):1549–1558, Nov. 1991. (Citado en página 87.)
- [233] L. HERTZ et R. W. SCHAFER : Multilevel Thresholding Using Edge Matching. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 44(3):279–295, Dec. 1988. (Citado en página 87.)
- [234] S. VENKATESH et P. L. ROSIN : Dynamic Threshold Determination by Local and Global Edge Evaluation. *Graphical Models and Image Processing*, 57(2):146–160, Mar. 1995. (Citado en página 87.)
- [235] C. A. MURTHY et S. PAL : Fuzzy Thresholding: Mathematical Framework, Bound Functions and Weighted Moving Average Technique. *Pattern Recognition Letters*, 11(3):197–206, Mar. 1990. (Citado en página 87.)
- [236] N. VIEIRA-LOPES, P. A. MOGADOURO, H. BUSTINCE et P. MELO-PINTO : Automatic Histogram Threshold Using Fuzzy Measures. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(1):199–204, Ene. 2010. (Citado en página 87.)
- [237] L. K. HUANG et M. J. WANG : Image Thresholding by Minimizing the Measures of Fuzziness. *Pattern Recognition*, 28(1):41–55, Ene. 1995. (Citado en página 87.)
- [238] K. RAMAR, S. ARUMUGAM, S. N. SIVANANDAM, L. GANESAN et D. MANIMEGALAI : Quantitative Fuzzy Measures for Threshold Selection. *Pattern Recognition Letters*, 21(1):1–7, Mar. 2000. (Citado en página 87.)
- [239] J. C. RUSS et J. Ch. RUSS : Automatic Discrimination of Features in Grey-Scale Images. *Journal of Microscopy*, 148(3):263–277, Dic. 1987. (Citado en página 88.)

- [240] A. PIKAZ et A. AVERBUCH : Digital Image Thresholding Based on Topological Stable-State. *Pattern Recognition*, 29(5):829–843, May. 1996. (Citado en página 88.)
- [241] C. K. LEUNG : Maximum Segmented Image Information Thresholding. *Graphical Models and Image Processing*, 60(1):57–76, Ene. 1998. (Citado en página 88.)
- [242] K. PAL et A. ROSENFELD : Image Enhancement and Thresholding by Optimization of Fuzzy Compactness. *Pattern Recognition Letters*, 7(2):77–86, Feb. 1988. (Citado en página 88.)
- [243] A. ROSENFELD : The Fuzzy Geometry of Image Subsets. *Pattern Recognition Letters*, 2(5):311–317, Sep. 1984. (Citado en página 88.)
- [244] Z. AVIAD et E. LOZINSKII : Image Enhancement and Thresholding by Optimization of Fuzzy Compactness. *Pattern Recognition Letters*, 5(5):321–328, May. 1987. (Citado en página 88.)
- [245] H. S. DON : A Noise Attribute Thresholding Method for Document Image Binarization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, volume 1, pages 231–234, Montreal, Canadá, Ago. 1995. (Citado en página 88.)
- [246] X. FERNÁNDEZ : Implicit Model-Oriented Optimal Thresholding Using the Kolmogorov-Smirnov Similarity Measure. In *15th International Conference on Pattern Recognition*, volume 4, pages 466–469, Barcelona, España, Sep. 2000. (Citado en página 88.)
- [247] G. GALLO et S. SPINELLO : Thresholding and Fast Iso-Contour Extraction with Fuzzy Arithmetic. *Pattern Recognition Letters*, 21(1):31–44, Ene. 2000. (Citado en página 88.)
- [248] S. GUO, Y. LIU et S. OZAWA : New Thresholding Method Based on Morphology and Fourth Central Moment. In *International Symposium on Multispectral Image Processing (ISMIP98)*, volume 3545 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, pages 317–320, Wuhan, China, Sep. 1998. (Citado en página 88.)
- [249] Y. LIU, R. FEINRICH et S. N. SRIHARI : An Object Attribute Thresholding Algorithm for Document Image Binarization. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Document Analysis and Recognition*, volume 1, pages 278–281, Tsukuba, Japón, Oct. 1993. (Citado en página 88.)
- [250] Y. LIU et S. N. SRIHARI : Document Image Binarization Based on Texture Features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(5):540–544, May. 1997. (Citado en página 88.)
- [251] P. K. SAHA et J. K. UDUPA : Optimum Image Thresholding Via Class Uncertainty and Region Homogeneity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(7):689–706, Jul. 2001. (Citado en página 88.)
- [252] Y. SOLIHIN et C. G. LEEDHAM : Integral Ratio: A New Class of Global Thresholding Techniques for Handwriting Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(8):761–768, Ago. 1999. (Citado en página 88.)
- [253] B. CHANDA et D. D. MAJUMDER : A Note on the Use of the Graylevel Co-Occurrence Matrix in Threshold Selection. *Signal Processing*, 15(2):149–167, Sep. 1988. (Citado en página 88.)

- [254] C. I. CHANG, K. CHEN, J. WANG et M. L. ALTHOUSE : A Relative Entropy-Based Approach to Image Thresholding. *Pattern Recognition*, 27(9):1275–1289, Sep. 1994. (Citado en página 88.)
- [255] N. R. PAL et S. K. PAL : Entropic Thresholding. *Signal Processing*, 16(2):97–108, Feb. 1989. (Citado en página 88.)
- [256] W. N. LIE : A Note on the Use of the Graylevel Co-Occurrence Matrix in Threshold Selection. *Signal Processing*, 33(1):121–126, Jul. 1993. (Citado en página 88.)
- [257] A. S. ABUTALED : Automatic Thresholding of Gray-Level Pictures Using Two-Dimensional Entropy. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 47(1):22–32, Jul. 1989. (Citado en página 88.)
- [258] A. BEGHDAI, A. L. NEGRATE et P. V. DE-LESEGNO : Entropic Thresholding Using a Block Source Model. *Graphical Models and Image Processing*, 57(3):197–205, May. 1995. (Citado en página 88.)
- [259] L. WU, M. SONGDE et L. HANQING : An Effective Entropic Thresholding for Ultrasonic Images. In *14th International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, pages 1552–1554, Brisbane, Australia, Ago. 1998. (Citado en página 88.)
- [260] H. D. CHENG et Y. H. CHEN : Fuzzy Partition of Two-Dimensional Histogram and Its Application to Thresholding. *Pattern Recognition*, 32(5):825–843, May. 1999. (Citado en página 88.)
- [261] L. LI, J. GONG et W. CHEN : Gray-Level Image Thresholding Based on Fisher Linear Projection of Two-Dimensional Histogram. *Pattern Recognition*, 30(5):743–749, May. 1997. (Citado en página 88.)
- [262] A. D. BRINK : Thresholding of Digital Images Using Two-Dimensional Entropies. *Pattern Recognition*, 25(8):803–808, Ago. 1992. (Citado en página 88.)
- [263] A. D. BRINK : Gray-Level Thresholding of Images Using a Correlation Criterion. *Pattern Recognition Letters*, 9(5):335–341, Jun. 1989. (Citado en página 88.)
- [264] A. D. BRINK : Minimum Spatial Entropy Threshold Selection. *IEEE Proceedings Vision, Image and Signal Processing*, 142(3):128–132, Jun. 1995. (Citado en página 88.)
- [265] G. BORGEFORS : Distance Transformations in Digital Images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 34(3):344–371, Jun. 1986. (Citado en página 88.)
- [266] N. FRIEL et I. S. MOLCHANOV : A New Thresholding Technique Based on Random Sets. *Pattern Recognition*, 32(9):1505–1517, Sep. 1999. (Citado en página 88.)
- [267] W. NIBLACK : *An Introduction to Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 1^a édition, 1986. (Citado en página 89.)
- [268] O. D. TRIER et A. K. JAIN : Goal-Directed Evaluation of Binarization Methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(12):1191–1201, Dic. 1995. (Citado en página 89.)
- [269] J. SAUVOLA et M. PIETIKAINEN : Adaptive Document Image Binarization. *Pattern Recognition*, 33(2):225–236, 2000. (Citado en página 89.)
- [270] C. WOLF et J. M. JOLION : Extraction and Recognition of Artificial Text in Multimedia Documents. *Formal Pattern Analysis and Applications*, 6(4):309–326, 2004. (Citado en página 89.)

- [271] M. L. FENG et Y. P. TAN : Contrast Adaptative Binarization of Low Quality Document Images. *IEICE Electronics Express*, 1(16):501–506, Nov. 2004. (Citado en página 89.)
- [272] J. BERSEN : Dynamic Thresholding of Gray-Level Images. In *8th International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, pages 1251–1255, Paris, Francia, Oct. 1986. (Citado en página 89.)
- [273] Y. YASUDA, M. DUBOIS et T. S. HUANG : Data Compression for Check Processing Machines. *Proceedings of the IEEE*, 68(7):874–885, Jul. 1980. (Citado en página 89.)
- [274] J. M. WHITE et G. D. ROHRER : Image Thresholding for Optical Character Recognition and Other Applications Requiring Character Image Extraction. *IBM Journal of Research and Development*, 27(4):400–411, Jul. 1983. (Citado en página 89.)
- [275] N. B. VENKATESWARLU et R. D. BOYLE : New Segmentation Techniques for Image Analysis. *Image and Vision Computing*, 13(7):573–583, Sep. 1995. (Citado en página 89.)
- [276] P. W. PALUMBO, P. SWAMINATHANAND et S. N. SRIHARI : Document Image Binarization: Evaluation of Algorithms, Dic. 1986. (Citado en página 89.)
- [277] M. KAMEL et A. ZHAO : Extraction of Binary Character Graphics Images from Grayscales Document Images. *Graphical Models and Image Processing*, 55(3):203–217, May. 1993. (Citado en página 89.)
- [278] Y. YANG et H. YAN : An Adaptative Logical Method for Binarization of Degraded Document Images. *Pattern Recognition*, 33(5):787–807, May. 2000. (Citado en página 89.)
- [279] S. D. YANOWITZ et A. M. BRUCKSTEIN : A New Method for Image Segmentation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 46(1):82–95, Abr. 1989. (Citado en página 89.)
- [280] D. SHEN et H. S. IP : A Hopfield Neural Network for Adaptative Image Segmentation: An Active Surface Paradigm. *Pattern Recognition Letters*, 18(1):37–48, Ene. 1997. (Citado en página 89.)
- [281] J. R. PARKER : Gray Level Thresholding in Badly Illuminated Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(8):813–819, Ago. 1991. (Citado en página 89.)
- [282] A. E. SAVAKIS : Adaptive Document Image Thresholding Using Foreground and Background Clustering. In *International Conference on Image Processing (ICIP98)*, volume 3, pages 785–789, Chicago, IL, U.S.A., Oct. 1998. (Citado en página 89.)
- [283] F. CHANG, K. H. LIANG, T. M. TAN et W. L. HWANG : Binarization of Document Images Using Hadamard Multiresolution Analysis. In *Proceedings of the 5th International Conference on Document Analysis and Recognition*, volume 2, pages 157–160, Bangalore, India, Sep. 1999. (Citado en página 89.)
- [284] W. OH et W. B. LINDQUIST : Image Thresholding by Indicator Kriging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(7):590–602, Jul. 1999. (Citado en página 90.)
- [285] H. MINKOWSKI : Volumen und Oberfläche. *Mathematische Annalen*, 57:447–495, 1903. (Citado en página 92.)

- [286] G. MATHERON : *Random Sets and Internal Geometry*. Wiley, Nueva York, NY, U.S.A., 1st édition, 1975. (Citado en página 92.)
- [287] J. SERRA : Introduction to Mathematical Morphology. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 35(3):283–305, Sep. 1986. (Citado en página 92.)
- [288] W. BURGER et M. J. BURGE : *Principles of Digital Image Processing. Fundamental Techniques*. Springer-Verlag, London, U. K., 1st édition, 2009. (Citado en página 92.)
- [289] C. M. BISHOP : *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer Science, New York, NY, U.S.A., 1st édition, 2006. (Citado en página 96.)
- [290] D. LU et Q. WENG : A Survey of Image Classification Methods and Techniques for Improving Classification Performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5):823–870, Mar. 2007. (Citado en página 96.)
- [291] C. SOLOMON et T. BRECKON : *Fundamentals of Digital Image Processing. A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell, Oxford, U. K., 1st édition, 2011. (Citado en páginas 96 y 104.)
- [292] P. GUHA : Automated visual inspection of steel surface, texture segmentation and development of a perceptual similarity measure. Mémoire de D.E.A., Department of Computer Science and Engineering, Indian Institute of Technology, India, 2001. (Citado en página 99.)
- [293] S. GHORAI, A. MUKHERJEE, M. GANGADARAN et P. K. DUTTA : Automatic Defect Detection on Hot Rolled Steel Products. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(3):612–621, Mar. 2013. (Citado en páginas 99, 103 y 104.)
- [294] N. NEOGI, D. K. MOANTA et P. K. DUTTA : Review of Vision-based Steel Surface Inspection Systems. *Journal on Image and Video Processing (EURASIP)*, 50(1):1–19, Nov. 2014. (Citado en página 99.)
- [295] F. DUPONT, C. ODET et M. CARTON : Optimization of the Recognition of Defects in Flat Steel Products with de Cost Matrices Theory. *NDT&E International*, 30(1):3–10, Ene. 1997. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [296] L. A. O. MARTINS, F. L.C. PADUA et P. E. M. ALMEIDA : Automatic Detection of Surface Defects on Rolled Steel Using Computer Vision and Artificial Neural Networks. In *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON10)*, volume 1, pages 1081–1086, Glendale, AZ, U.S.A., Nov. 2010. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [297] G. WU, H. ZHANG, X. SUN, J. XU et K. XU : A Bran-New Feature Extraction Method and its Application to Surface Defect Recognition of Hot Rolled Strips. In *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, volume 1, pages 2069–2074, Jinan, China, Ago. 2007. (Citado en páginas 102 y 104.)
- [298] S. W. YUN, N. W. KONG, G. LEE et P. G. PARK : Development of Defect Detection Algorithm in Cold Rolling. In *IEEE 2008 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS08)*, volume 1, pages 1729–1733, Seoul, Korea, Oct. 2008. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)

- [299] Y. C. LIU, Y. L. HSU, Y. N. SUN, S. J. TSAI, C. Y. HO et C. M. CHEN : A Computer Vision System for Automatic Steel Surface Inspection. In *2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEAS10)*, volume 1, pages 1167–1670, Taichung, China, Jun. 2010. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [300] Y. X. YANG, Q. LI, P. CHEN et X. Y. ZHANG : Strip Surface Defect Detection Algorithm Based on Background Difference. In *IEEE 2010 2nd Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS10)*, volume 2, pages 23–26, Beijing, China, Ago. 2010. (Citado en páginas 102 y 103.)
- [301] L. WEIWEI, Y. YUNHUI, L. JUN et Z. YAO : Automated On-Line Fast Detection for Surface Defect of Steel Strip Based on Multivariate Discriminant Function. In *IEEE 2nd International Symposium on Intelligent Information Technology Application (IITA08)*, volume 2, pages 493–497, Shanghai, China, Dec. 2008. (Citado en páginas 102 y 104.)
- [302] J. BLACKLEDGE et D. DUBOVITSKIY : A Surface Inspection Machine Vision System that Includes Fractal Texture Analysis. *Journal of Intelligent Systems*, 3(2):76–89, Ene. 2008. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [303] G. WU, H. KWAK, S. JANG, K. XU et J. XU : Design of Online Surface Inspection System of Hot Rolled Strip. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, volume 1, pages 2291–2295, Qindao, China, Sep. 2008. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [304] G. WU : Online Surface Inspection Technology of Cold Rolled Strips. In *Multimedia*, pages 205–232. Kazuki Nishi, 2012. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [305] M. R. YAZDCHI, A. G. MAHYARI et A. NAZERI : Detection and Classification of Surface Defects of Cold Rolling Mill Steel Using Morphology and Neural Network. In *IEEE 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation*, volume 1, pages 1071–1076, Viena, Austria, Dec. 2008. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [306] Z. YICHI, W. LV et L. XUEDONG : Defects Detection of Cold-Roll Steel Surface Based on MATLAB. In *3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA11)*, volume 1, pages 827–830, Shangshai, China, Ene. 2011. (Citado en páginas 102 y 103.)
- [307] J. ZHAO, Y. YANG et G. LI : The Cold Rolling Strip Surface Defect On-Line Inspection System Based on Machine Vision. In *2010 2nd Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems (PACCS)*, volume 1, pages 402–405, Beijing, China, Ago. 2010. (Citado en páginas 102 y 104.)
- [308] D. C. CHOI, Y. J. JEON, G. P. YUN et S. W. KIM : Pinhole Detection in Steel Slab Images Using Gabor Filter and Morphological Features. *Applied Optics*, 50(26):5122–5129, Sep. 2011. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [309] D. C. CHOI, Y. J. JEON, J. P. YUN, S. W. YUN et S. W. KIM : An Algorithm for Detecting Seam Cracks in Steel Plates. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6(12):1459–1462, Dec. 2012. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [310] P. P. JONKER, R. P. W. DUIN et D. de RIDDER : Pattern Recognition for Metal Defect Detection. *Steel Grips: Journal of Steel and Related Materials*, 1(1):20–23, Ene. 2003. (Citado en páginas 102 y 104.)

- [311] W. B. LI, C. H. LU et J. C. ZHANG : A Local Annular Contrast Based Real-Time Inspection Algorithm for Steel Bar Surface Defects. *Applied Surface Science*, 258(16):6080–6086, Jun. 2012. (Citado en página 102.)
- [312] J. P. YUN, C. PARK, H. BAE, H. HWANG et S. CHO : Vertical Scratch Detection Algorithm for High-Speed Scale-Covered Steel (BIC) (Bar in Coil). In *IEEE 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS)*, volume 1, pages 342–345, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 2010. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [313] Y. JEON, J. P. YUN, D. CHOI et S. W. KIM : Defect Detection Algorithm for Corner Cracks in Steel Billet Using Discrete Wavelet Transform. In *ICCAS-SICE International Joint Conference*, volume 1, pages 2769–2773, Fukuoka, Japón, Ago. 2009. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [314] C. PARK et S. C. WON : An Automated Web Surface for Hot Wire Rod Using Undecimated Wavelet Transform and Support Vector Machine. In *IEEE Proceedings of the 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON 09)*, volume 1, pages 2411–2415, Porto, Portugal, Nov. 2009. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [315] J. P. YUN, S.H. CHOI et S. W. KIM : Vision-Based Defect Detection of Scale-Covered Steel Billet Surfaces. *Optical Engineering*, 48(3):1–9, Mar. 2009. (Citado en páginas 102 y 103.)
- [316] J. H. GUO, X. D. MENG et M. D. XIONG : Study on Defection Segmentation for Steel Surface Image Based on Image Edge Detection and Fisher Discriminant. *Journal of Physics: Conference Series*, 48(1):364–368, Ago. 2006. (Citado en páginas 102 y 103.)
- [317] S. H. CHOI, J. P. YUN, B. SEO, Y. S. PARK et S. W. KIM : Real-Time Defects Detection Algorithm for High-Speed Steel Bar in Coil. *International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering*, 1(1):22–26, Oct. 2007. (Citado en páginas 102 y 103.)
- [318] Z. JIULIANG, L. WEIWEI, Y. FENG, L. JUN, Z. YAO et Y. YUNHUI : Research on Surface Quality Evaluation System of Steel Strip Based on Computer Vision. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology Application (IITA09)*, volume 1, pages 32–35, NanChang, China, Nov. 2009. (Citado en páginas 102, 103 y 104.)
- [319] E. ALEGRE, J. BARREIRO, M. CASTEJÓN et S. SUÁREZ : Computer Vision and Classification Techniques on the Surface Finish Control in Machining Processes. In *Image Analysis and Recognition*, volume 5112, pages 1101–1110. Springer-Verlag, 2008. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [320] A. BORSELLI, V. COLLA, M. VANNUCCI et M. VEROLI : A Fuzzy Inference System Applied to Defect Detection in Flat Steel Production. In *2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ10)*, volume 1, pages 1–6, Barcelona, España, Jul. 2010. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [321] H. JIA, Y. L. MURPHEY, J. SHI et T. CHANG : An Intelligent Real-Time Vision System for Surface Defect Detection. In *IEEE Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR04)*, volume 3, pages 239–242, Cambridge, U.K., Ago. 2004. (Citado en páginas 103 y 104.)

- [322] J. LI, J. SHI et T. S. CHANG : On-Line Seam Detection in Rolling Processes Using Snake Projection and Discrete Wavelet Transform. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(5):926–939, Oct. 2007. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [323] B. R. SURESH, R. A. FUNDAKOWSKI, T. S. LEVITT et J. E. OVERLAND : A Real-Time Automated Visual Inspection System for Hot Steel Slabs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-5(6):563–572, Nov. 1983. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [324] K. CHOI, K. KOO et J. S. LEE : Development of Defect Classification Algorithm for POSCO Rolling Strip Surface Inspection System. In *International Joint Conference SICE-ICASE*, volume 1, pages 2499–2502, Busan, Korea, Oct. 2006. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [325] D. C. CHOI, Y. J. JEON, S. J. LEE, J. P. YUN et S. W. KIM : Oilmarks Detection Algorithm in Steel Plates. In *Proceedings of the 18th International Conference on Systems (CSCC14)*, volume 1, pages 239–242, Santorini, Grecia, Jul. 2014. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [326] Y. J. JEON, D. C. CHOI, J. P. YUN, C. PARK et S. W. KIM : Detection of Scratch Defects on Slab Surface. In *2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS11)*, volume 1, pages 1274–1278, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 2011. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [327] Y. J. JEON, D. C. CHOI, J. P. YUN, C. PARK, H. BAE et S. W. KIM : Automated Inspection Algorithm for Thick Plate Using Dual Light Switching Lighting Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6(12):1528–1531, Dec. 2012. (Citado en página 103.)
- [328] Y. J. JEON, D. C. CHOI, S. J. LEE, J. P. YUN et S. W. KIM : Defect Detection for Corner Cracks in Steel Billet Using a Wavelet Reconstruction Method. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(2):227–237, Feb. 2014. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [329] C. PARK, S. CHOI et S. WON : Vision-Based Inspection for Periodic Defects in Steel Wire Rod Production. *Optical Engineering*, 49(1):1–10, Ene. 2010. (Citado en página 103.)
- [330] S. TOSHIHIRO, T. HIDEKI et T. YASUO : Automatic Surface Inspection System for Tin Mill Black Plate. Rapport technique, JFE TECHNICAL REPORT, Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba-shi, Chiba Pref., Japón, 2010. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [331] J. P. YUN, S. H. CHOI, B. SEO, C. H. PARK et S. W. KIM : Defects Detection on Billet Surface Using Optimized Gabor Filter. In *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, volume 1, pages 77–82, Seoul, Korea, Jul. 2008. (Citado en página 103.)
- [332] J. P. YUN, D. C. CHOI, Y. J. JEON, C. PARK et S. W. KIM : Defect Inspection System for Steel Wire Rods Produced by Hot Rolling Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9-12):1625–1634, Feb. 2014. (Citado en página 103.)
- [333] J. ZHANG, D. KANG et S. WON : Detection of Scratch Defects for Wire Rod in Steelmaking Process. In *2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS10)*, volume 1, pages 319–323, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 2010. (Citado en página 103.)

- [334] H. ZHENG, L. X. KONG et S. NAHAVANDI : Automatic Inspection of Metallic Surfaces Defects Using Genetic Algorithms. *Journal of Materials Processing Technology*, 125(126):427–433, Feb. 2002. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [335] J. P. YUN, S. H. CHOI, Y. J. JEON, D. C. CHOI et S. W. KIM : Detection of Line Defects in Steel Billets Using Undecimated Wavelet Transform. In *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS08)*, volume 1, pages 1725–1728, Seoul, Korea, Oct. 2008. (Citado en página 103.)
- [336] A. CORD, F. BACH et D. JEULIN : Texture Classification by Statistical Learning from Morphological Image Processing: Application to Metallic Surfaces. *Journal of Microscopy*, 239(2):159–166, Ago. 2010. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [337] G. KANG et H. LIU : Surface Defects Inspection of Cold Rolled Strips Based on Neural Network. In *Proceedings of 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volume 8, pages 5034–5037, Guangzhou, China, Ago. 2005. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [338] P. CALEB et M. STEUER : Classification of Surface Defects on Hot Rolled Steel Using Adaptive Learning Methods. In *4th International Conference on Knowledge-Based Intelligence Engineering Systems and Allied Technologies (KES00)*, volume 1, pages 103–108, Brighton, U.K., Ago. 2000. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [339] M. POPAT et S. V. BARAI : Defect Detection and Classification Using Machine Learning. In *16th WCNDT World Conference on Non Destructive Testing*, volume 1, Montreal, Canada, Ago. 2004. (Citado en páginas 103 y 104.)
- [340] B. SUVDA, J. AHN et J. KO : Steel Surface Defects Detection and Classification Using SIFT and Voting Strategy. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 6(2):161–166, Ene. 2012. (Citado en página 104.)
- [341] K. M. KIM, B. J. LEE, K. LYU et G. T. PARK : Design of a Binary Decision Tree Using the Genetic Algorithm and K-Means Algorithm for Recognition of the Defect Patterns of Cold Mill Strip. In *1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings (FUZZ-IEEE99)*, volume 2, pages 1081–1085, Seoul, Korea, Ago. 1999. (Citado en página 104.)
- [342] Y. YUNHUI, S. KECHEN, X. ZHITAO et F. XUEHUI : The Strip Steel Surface Defects Classification Method Based on Weak Classifier Adaptive Enhancement. In *2011 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA11)*, volume 3, pages 958–961, Shanghai, China, Ene. 2011. (Citado en página 104.)
- [343] C.S. LEE, C. H. CHO, J. Y. CHOI, Y. K. KIM et S. H. CHOI : Feature Extraction Algorithm Based on Adaptive Wavelet Packet for Surface Defect Classification. In *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 673–676, Lausanne, Suiza, Sep. 1996. (Citado en página 104.)
- [344] K. X. PENG et X. L. ZHANG : Classification Technology for Automatic Surface Defects Detection of Steel Strip Based on Improved BP Algorithm. In *5th International Conference on Natural Computation (ICNC09)*, volume 1, pages 110–114, Tianjin, China, Ago. 2009. (Citado en página 104.)

- [345] B. TANG, J. Y. KONG, X. D. WANG et C. LI : Surface Inspection System of Steel Strip Based on Machine Vision. In *IEEE 2009 1st International Workshop on Database Technology and Applications*, volume 1, pages 359–362, Wuhan, Hubei, China, Abr. 2009. (Citado en página 104.)
- [346] K. AGARWAL, R. SHIVPURI, Y. ZHU, T. S. CHANG et H. HUANG : Process Knowledge Based Multi-Class Support Vector Classification (PK-MSVM) Approach for Surface Defects in Hot Rolling. *Expert Systems with Applications*, 38(6):7251–7262, Jun. 2011. (Citado en página 104.)
- [347] J. MASCI, U. MEIER, D. CIRESAN, J. SCHMIDHUBER et G. FRICOUT : Steel Defect Classification with Max-Pooling Convolutional Neural Networks. In *The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN12)*, volume 1, pages 1–6, Brisbane, QLD, Australia, Jun. 2012. (Citado en página 104.)
- [348] D. DJUKIC et S. SPUZIC : Statistical Discriminator of Surface Defects on Hot Rolled Steel. In *Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ07)*, volume 1, pages 158–163, Hamilton, Nueva Zelanda, Dic. 2007. (Citado en página 104.)
- [349] W. A. YASNOFF, J. K. MUI et J. W. BACUS : Error Measures for Scene Segmentation. *Pattern Recognition*, 9(4):217–231, 1977. (Citado en página 107.)
- [350] M. D. LEVINE et A. M. AHMED : Dynamic Measurement of Computer Generated Image Segmentations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-7(2):155–164, Mar. 1996. (Citado en página 107.)
- [351] Y. J. ZHANG : A Survey on Evaluation Methods for Image Segmentation. *Pattern Recognition*, 29(8):1335–1346, Ago. 1996. (Citado en página 107.)
- [352] M. SOKOLOVA, N. JAPKOWICZ et S. SZPAKOWICZ : Beyond Accuracy, F-score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. In *AI 2006: Advances in Artificial Intelligence*, volume 4304 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1015–1021. Springer Berlin Heidelberg, 2006. (Citado en página 110.)
- [353] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, C. GÁLVEZ-FERNÁNDEZ, F. J. MARTÍN-TAPIA, R. GONZÁLEZ et J. M. BONELO : Real-Time Supervision Annealing Process in Stainless Steel Production Lines. *Journal of Metallurgical Engineering*, 3(1):1–6, Ene. 2014. (Citado en página 111.)
- [354] Various AUTHORS : *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*. ASM International, Materials Park, Ohio, U.S.A., 1^a édition, 1994. (Citado en páginas 112, 115 y 141.)
- [355] M. ZHANG et G. SHAO : Characterization and Properties of Oxide Scales on Hot-Rolled Strips. *Materials Science and Engineering: A*, 452-453:189–193, Abr. 2007. (Citado en páginas 112 y 114.)
- [356] T. ISHIDA, Y. HARAYANA et S. YAGUCHI : Oxidation of 304 Stainless Steel in High-Temperature Steam. *Journal of Nuclear Materials*, 140(1):74–84, Ago. 1986. (Citado en página 112.)
- [357] W. ZIELINSKI, A. A. ABDULUYAHED et K. J. KURZYDŁOWSKI : TEM Studies of Dislocation Substructure in 316 Austenitic Stainless Steel Strained after Annealing in Various Environments. *Materials Science and Engineering*, 249(1-2):91–96, Jun. 1998. (Citado en página 112.)

- [358] W. ZIELINSKI et K. J. KURZYDLOWSKI : TEM Studies of the Oxide Scales Formed on Type 316 Stainless Steel During Annealing at 600 °C in a Vacuum and Air. *Scripta Materialia*, 43(1):33–37, Jun. 2000. (Citado en página 112.)
- [359] T. BAUDIN, C. QUESNE, J. JURA et R. PENELLE : Microstructural Characterization in a Hot-rolled, Two-phase Steel. *Materials Characterization*, 47(1):365–373, December 2001. (Citado en página 112.)
- [360] P. C. PISTORIUS, N. A. QUAGRAINE et C. COETZEE : Descaling Behaviour of Stainless Steel Following Simulated Reheating. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 10:607–616, December 2003. (Citado en página 112.)
- [361] ASM-COMMITTEE : *Source Book on Stainless Steels*. ASM International, Metal Park, Ohio, U.S.A., 3ª edición, 1976. (Citado en página 114.)
- [362] G. TOTTEN, M.A. HOWES et T. INOUE : *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Ohio, U.S.A., 1ª edición, 2001. (Citado en página 114.)
- [363] L. F. LI, P. CAENEN et M. F. JIANG : Electrolytic Pickling of the Oxide Layer on Hot-rolled 304 Stainless Steel in Sodium Sulphate. *Corrosion Science*, 50(10):2824–2830, Jul. 2008. (Citado en página 115.)
- [364] Varios AUTORES : Proyecto de investigación sobre la metodología de detección de cascarilla residual en líneas de proceso de material procedente de lc. informe final fase i. Rapport technique, Instituto de Automática Industrial (IAI-CSIC), Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga, Instituto de Microelectrónica de Sevilla, T.C.C, S.A., Anafocus, S.L., Málaga, España, 2002. (Citado en página 121.)
- [365] T. W. NG et S. C. YEO : Aesthetic Laser Marking Assessment using Spectrophotometers. *Journal of Materials Processing Technology*, 104(3):280–283, Dic. 2000. (Citado en página 121.)
- [366] R. GUILLAMET, M. LENGLET et F. ADAM : Reflectance Spectroscopy of Oxides Films α -Cr₂O₃ and α -Fe₂O₃ on Iron. *Solid State Communications*, 81(8):633–637, Feb. 1992. (Citado en página 121.)
- [367] S. LURIDIANA et A. MIOTELLO : Spectrophotometric Study of Oxide Growth on Arc Evaporated TiN and ZrN Coatings during Hot Air Oxidation Tests. *Thin Solid Films*, 290-291(0):289–293, Dic. 1996. (Citado en página 121.)
- [368] R. Karlsson B. KARLSSON et G. CARL : Optical Constants and Spectral Selectivity of Stainless Steel and its Oxides. *Journal of Applied Physics*, 53(9):6340–6346, Sep. 1982. (Citado en página 121.)
- [369] ASTM Subcommittee A01-17 : *ASTM A480 / A480M. Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet and Strip*. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A., Abr. 2010. (Citado en páginas 139, 304 y 312.)
- [370] Varios AUTORES : Product guide. Rapport technique, Sandvik, New South Wales, Australia, 2011. (Citado en página 140.)
- [371] ASTM Subcommittee E04.08 : *ASTM E112-10. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A., Jul. 2004. (Citado en página 140.)

- [372] G. BREGLIOZZI, A. Di SCHINO, S.I. AHMED, J.M. KENNY et H. HAEFKE : Cavitation Wear Behaviour of Austenitic Stainless Steels with Different Grain Sizes. *Wear*, 258(1):503–510, December 2005. (Citado en página 141.)
- [373] N. V. SMIRNOV et I. V. DUNIN-BARKOWSKIJ : *Cálculo de Probabilidades y Estadística*. Editorial Paraninfo, Madrid, España, 1979. (Citado en página 153.)
- [374] J. CASAL et E. MATEU : Tipos de Muestreo. *Revista de Epidemiología y Medicina Preventiva*, 1:3–7, 2003. (Citado en página 153.)
- [375] C. Martínez BENCARDINO : *Estadística y Muestreo*. Ecoe Ediciones, Bogotá, Colombia, 2007. (Citado en página 154.)
- [376] E. MATEU et J. CASAL : Tamaño de la Muestra. *Revista de Epidemiología y Medicina Preventiva*, 1:8–14, 2003. (Citado en página 154.)
- [377] J. W. JEWETT et R. A. SERWAY : *Física para ciencias e ingenierías*, volume 2. Thomson International, 6ª edición, 2006. (Citado en página 159.)
- [378] E. HECHT : *Optics*. Addison Wesley, San Francisco, CA, U.S.A., 4ª edición, 2001. (Citado en páginas 159, 321, 334 y 343.)
- [379] W. J. SMITH : *Modern Optical Engineering. The Design of Optical Systems*. McGraw-Hill, New York, U.S.A., 4ª edición, 2008. (Citado en página 159.)
- [380] Varios AUTORES : Análisis de imagen y visión artificial: ópticas. Rapport technique, Infaimon S.L., Vergós 55, Barcelona, España, 2010. (Citado en página 159.)
- [381] George Biddel AIRY : On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 5:283–290, 1835. (Citado en página 167.)
- [382] Lord RAYLEIGH : Investigations in Optics, with Special Reference to the Spectroscope. *Philosophical Magazine*, 8:261–274, 1879. (Citado en página 167.)
- [383] P. B. CATRYSSSE et B. A. WANDELL : Roadmap for CMOS Image Sensors: Moore meets Planck and Sommerfeld. *Digital Photography*, 5678:1–13, Feb. 2005. (Citado en página 168.)
- [384] J. CONRAD : Depth of Field in Depth, Mar. 2006. [Online]. Available: <http://www.largeformatphotography.info/articles/DoFinDepth.pdf>. (Citado en página 168.)
- [385] Diffuse Incident Lighting, 2010. [Online]. Available: <http://www.vision-doctor.co.uk/illumination-techniques/diffuse-incident-light.html>. (Citado en página 178.)
- [386] F. PERNKOPF et P. O'LEARY : Image Acquisition Techniques for Automatic Visual Inspection of Metallic Surfaces. *NDT&E International*, 36(1):609–617, Jun. 2003. (Citado en página 178.)
- [387] W. Ross MCCLUNEY : *Introduction to Radiometry and Photometry*. Artech House, INC, 685 Canton Street, Norwood, MA, U.S.A., 1ª edición, 1994. (Citado en página 179.)
- [388] D. A. FORSYTH et J. PONCE : *Computer Vision. A Modern Approach*. Prentice-Halll., New Jersey, U.S.A., 1ª edición, 2003. (Citado en páginas 180, 321 y 332.)

- [389] A. NOVINI : Fundamentals of Strobe Lighting for Machine Vision. *In Proceedings of Vision 87 Conference*, pages 13–25, Detroit, MI, U.S.A., Jun. 1987. (Citado en página 184.)
- [390] M. A. GENNERT et N. WITTELS : Uniform Frontal Illumination of Planar Surfaces: Criteria for Optimal Lighting Design. *In Proceedings SPIE Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision VIII*, número 2065, pages 62–69, Boston, Massachusetts, U.S.A., Mar. 1994. (Citado en página 190.)
- [391] Various AUTHORS : *DIALux Versión 4.7. Manual de usuario*. Dial GmbH., 58507 Ludensheid, Alemania, Mar. 2009. (Citado en página 191.)
- [392] S. MITRA : *Digital Signal Processing*. McGraw-Hill Science, New York, U.S.A., 3ª edición, Ene. 2005. (Citado en página 208.)
- [393] Various AUTHORS : *Matlab Signal Processing Toolbox. User's Guide*. The Mathworks Inc., Natick, MA, U.S.A., Mar. 2009. (Citado en página 208.)
- [394] T. M. COVER : Learning in Pattern Recognition. *In Methodologies of Pattern Recognition*, pages 111–132. Academic Press, 1969. (Citado en página 222.)
- [395] D. W. MARQUARDT : An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431–441, Jun. 1963. (Citado en página 222.)
- [396] R. REED : Pruning Algorithms: A Survey. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4(5):740–747, Sep. 1993. (Citado en página 222.)
- [397] C. G. SPÍNOLA, J. M. CAÑERO-NIETO, S. ESPEJO, S. MORILLAS, D. GUINEA, D. MARTÍN, F. GARCÍA-VACAS, E. VILLANUEVA, J. M. BONELO et J. VIZOSO : Dispositivo para la Detección y Clasificación de óxido Residual en Líneas de Producción de Laminados Metálicos. Oficina Española de Patentes y Marcas, Número de Publicación: 2 284 410, Número de Solicitud: 200700865, Abr. 2007. (Citado en página 238.)
- [398] Varios AUTORES : Esquemas de producción. Rapport technique, Grupo Acerinox, Santiago de Compostela 100, Madrid, España, 2010. (Citado en página 295.)
- [399] Various AUTHORS : Processes. Rapport technique, Columbus Stainless PTY Ltd, Hendrina Rd, Middelburg 1050, South Africa, 2010. (Citado en página 295.)
- [400] J. R. DAVIS : *Stainless Steels*. ASM International, Materials Park, Ohio, U.S.A., 3ª edición, 1999. (Citado en páginas 295, 306 y 313.)
- [401] V. B. GINZBURG : *High-quality Steel Rolling: Theory and Practice*. CRC Press, New York, U.S.A., 1ª edición, 1993. (Citado en página 295.)
- [402] V. B. GINZBURG et R. BALLAS : *Flat Rolling Fundamentals (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*. CRC Press, New York, U.S.A., 1ª edición, Jun. 2000. (Citado en página 295.)
- [403] M. P. GROOVER : *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., Naucalpan de Juárez, México, 1ª edición, 1997. (Citado en páginas 295 y 333.)
- [404] J. G. LENARD : *Primer on Flat Rolling*. Elsevier Science, London, U.K., 1ª edición, 2007. (Citado en página 295.)

- [405] Schuler GMBH : *Metal Forming Handbook*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1^a édition, 1998. (Citado en página 295.)
- [406] Various AUTHORS : *The Making, Shaping and Treating of Steel. Steelmaking and Refining Volume*. The AISE Steel Foundation, Pittsburg, PE, U.S.A., 11^a édition, 1998. (Citado en página 297.)
- [407] ASTM Subcommittee A01-14 : *ASTM A380-06. Standard Practice for Cleaning, Descaling and Passivation of Stainless Steel Part, Equipment and Systems*. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A., May. 2006. (Citado en página 307.)
- [408] Various AUTHORS : Materials and Applications Series. Rapport technique, Euro Inox, Diamant Building, Bd. Aug. Ryers 80, 1030 Brussels, Belgium, 2010. (Citado en página 315.)
- [409] Varios AUTORES : El acero inoxidable en la construcción. Rapport technique, Arcelor-Mittal, 19 avenue de la Liberté, L-2930 Luxembourg, 2002. (Citado en página 317.)
- [410] E. GÓMEZ-GONZÁLEZ : Guía básica de conceptos radiometría y fotometría. Rapport technique, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2006. (Citado en páginas 321 y 325.)
- [411] B. JÄHNE : *Digital Image Processing*. Springer, Berlin, Germany, 6^a édition, 2005. (Citado en página 321.)
- [412] R. H. SIMONS et A. R. BEAN : *Lighting Engineering: Applied Calculations*. Architectural Press, London, U.K., 1^a édition, 2001. (Citado en página 321.)
- [413] S. K. NAYAR, K. IKEUCHI et T. KANADE : Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(7):611–634, Jul. 1991. (Citado en páginas 332 y 334.)
- [414] J. A. RODRÍGUEZ-TIRADO : *Inspección del acabado superficial para procesos de rectificado y fresado mediante un esparcímetero de luz láser*. Thèse de doctorat, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Santiago de Querétaro, México, 2009. (Citado en página 333.)
- [415] Various AUTHORS : *ANSI/ASME B46.1-2002: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*. American National Standard and American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, NY, U.S.A., 1^a édition, 2003. (Citado en página 334.)
- [416] G. A. MARTÍNEZ et J. R. TORGA : Sistema para medición de la función de reflectancia bidireccional. In *IV Conferencia Panamericana de END*, volume 12, Buenos Aires, Argentina, Oct. 2007. (Citado en página 337.)
- [417] J. J. KOENDERINK, A. J. DOORN, K. J. DANA et S. K. NAYAR : Bidirectional Reflection Distribution Function of Thoroughly Pitted Surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 31(2-3):129–144, Abr. 1999. (Citado en página 337.)
- [418] W. MATUSIK, H. PFISTER, M. BRAND et L. MCMILLAN : A Data-Driven Reflectance Model. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):759–769, Jul. 2003. (Citado en página 338.)
- [419] A. NGAN, F. DURAND et W. MATUSIK : Experimental Analysis of BRDF Models. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, volume 2, pages 117–226, Konstanz, Germany, Jun. 2005. (Citado en página 338.)

- [420] J. H. LAMBERT : *Lambert's Photometrie (1760): Photometria sive de mensura de gradibus luminis, colorum et umbrae*. W. Engelmann, Leipzig, Germany, 1^a édition, 1892. (Citado en página 339.)
- [421] S. K. NAYAR et M. OREN : Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision. *International Journal of Computer Vision*, 14(3):227–251, Abr. 1995. (Citado en página 340.)
- [422] B. T. PHONG : Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM*, 18(6):311–317, Jun. 1975. (Citado en página 341.)
- [423] R. L. COOK et K. E. TORRANCE : A Reflectance Model for Computer Graphics. In *DARPA Image Understanding Workshop*, número 1, pages 1–19, Los Angeles, CA, U.S.A., Feb. 1987. (Citado en página 341.)
- [424] K. TORRANCE et E. SPARROW : Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 9(57):1105–1114, Jul. 1967. (Citado en página 341.)
- [425] P. BECKMANN et A. SPIZICHINO : *The Scattering of Electromagnetic Waves form Rough Surfaces*. Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts, U.S.A., 1^a édition, 1987. (Citado en página 341.)
- [426] S. H. WESTIN, H. LI et K. H. TORRANCE : A Comparison of Four BRDF Models. *Research Note PCG0402 Cornell University Program of Computer Graphics*, pages 1–10, Abr. 2004. (Citado en página 341.)
- [427] L. B. WOLFF, S. K. NAYAR et M. OREN : Improved Diffuse Reflection Models for Computer Vision. *International Journal of Computer Vision*, 30(1):55–71, Oct. 1998. (Citado en página 342.)
- [428] Y. LIU, J. KONG, X. WANG et F. JIANG : Research on Image Acquisition of Automatic Surface Vision Inspection Systems for Steel Sheet. In *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE10)*, volume 6, pages 189–192, Chengdu, China, Ago. 2010. (Citado en página 342.)
- [429] B. KWOK : *Analysis of Radiosity Techniques in Computer Graphics*. Thèse de doctorat, Departament of Computer Science, York University, Toronto, Ontario, Canada, 1992. (Citado en página 357.)
- [430] L. GRITZ et J. K. HAHN : BMRT: A Global Illumination Implementation of the RenderMan Standard. *Journal of Graphics Tools*, 1(3):29–48, Feb. 1996. (Citado en página 357.)
- [431] A. WATT et M. WATT : *Advanced Animation and Rendering Techniques. Theory and Practice*. Addison-Wesley Professional, New York, NY, U.S.A., 1^a édition, 1992. (Citado en página 357.)
- [432] C. M. GORAL, K. E. TORRANCE, D. P. GREENBERG et B. BATTAILEI : Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 18(3):213–222, Jul. 1984. (Citado en página 358.)
- [433] Various AUTHORS : *Cricket Surface Inspection Light. Operating Manual*. Unilux Inc., Saddle Brook, New York, U.S.A., Nov. 2005. (Citado en página 360.)
- [434] Various AUTHORS : *Lith-o-light-5 Surface Inspection Light. Operating Manual*. Unilux Inc., Saddle Brook, New York, U.S.A., Nov. 2005. (Citado en página 360.)

- [435] Various AUTHORS : *LumEdit Versión 1.0. Manual de usuario*. Relux Informatik AG., CH-4018 Basel, Suiza, Feb. 2001. (Citado en página 360.)
- [436] A. PARDO-MERINO et M. A. RUIZ-DÍAZ : *SPSS 11. Guía para el Análisis de Datos*. McGraw-Hill, Aravaca, España, 1ª edición, 2002. (Citado en página 389.)
- [437] M. GOOSSENS : *The Latex Graphics Companion: Illustrating Documents with TeX and PostScript*. Addison-Wesley, Massachusetts, U.S.A., 2ª edición, 2007. (Citado en página 451.)
- [438] W. MORA et A. BORBÓN : *Edición de textos científicos LaTeX: Composición, gráficos y beamer*. Revista digital, matemática, educación e internet, Cartago, Costa Rica, 1ª edición, 2009. (Citado en página 451.)
- [439] R. SIERRA-BRAVO : *Tesis doctorales y trabajos de investigación científica. Metodología general de su elaboración y documentación*. Paraninfo, Madrid, España, 2ª edición, 1988. (Citado en página 451.)

COLOFÓN

Esta tesis ha sido realizada empleando \LaTeX 2_ε y usando las fuentes *Palatino* de Hermann Zapf y *Euler*. Las listas numeradas se han realizado en *Bera Mono*. El estilo tipográfico se encuentra disponible para \LaTeX a través de CTAN como “**classicthesis**”.

Para la edición de la tesis como texto científico se ha utilizado información extraída de varios libros sobre \LaTeX [438, 437].

El procedimiento de elaboración y documentación de la redacción de la memoria está basado en pautas y directrices dadas en [439].

NOTA: Se han realizado algunas modificaciones del estilo `classicthesis.sty` sobre todo para su adaptación al idioma español.

Versión final realizada el 12 de octubre de 2015 a las 23:14.